GLASFASER-LASER-DOPPLER-ANEMOMETER FÜR MESSUNGEN IN VERBRENNUNGSMOTOREN

von

Herbert Krebs

Erlangen 1986

1987 № 91

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

GLASFASER-LASER-DOPPLER-ANEMOMETER FÜR MESSUNGEN IN VERBRENNUNGSMOTOREN

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Grades

DOKTOR - INGENIEUR

vorgelegt von

Herbert Krebs

Erlangen 1986

Als Dissertation vorgelegt bei der
Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 15. Juli 1986

Tag der Promotion: 31. Oktober 1986

Dekan: Prof. Dr. H. Brand

Berichterstatter: Prof. Dr. F. Durst
Prof. Dr. F. Pischinger

V O R W O R T

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Erlangen-Nürnberg und wurde von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt, im Rahmen des Vorhabens Nr. 288 "Einlaßturbulenz" finanziell gefördert.

Herrn Prof. Dr. Franz Durst, dem Leiter des Lehrstuhls, unter dessen wissenschaftlicher Anleitung diese Arbeit entstand, danke ich für die Übernahme des Referates dieser Dissertation sowie für seine zahlreichen Anregungen, Ideen und Kritiken, die wesentlich zum Gelingen der Arbeit beitrugen.

Ferner gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. F. Pischinger, Leiter des Lehrstuhls für angewandte Thermodynamik in Aachen, für die freundliche Bereitschaft zur Übernahme des Koreferates.

Herrn Horst Weber danke ich für die zahlreichen, fruchtbaren Diskussionen, die sehr zum physikalischen Verständnis der Materie und zu vielen schwierigen Problemlösungen beigetragen haben.

Herrn Dr.-Ing. Cameron Tropea danke ich für seine spontane und umfassende Hilfe auf der Datenerfassungsseite, Herrn Dipl.-Ing. Stefan Bopp danke ich für die Hilfe bei der Durchführung und Auswertung der Messungen im Modelldieselmotor.

Ich danke dem Institut für Kolbenmaschinen in Karlsruhe unter Herrn Prof. G. Jungbluth für die gewährte Unterstützung auf der ottomotorischen Seite innerhalb des gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Strömungsmechanik bearbeiteten FVV-Projektes. Auf der dieselmotorischen Seite danke ich der Firma Gebrüder SULZER AG in Winterthur (Schweiz), insbesondere dem Leiter des Strömungslabors 1504, Herrn Dipl.-Ing. H. Durrer, sowie seinen Mitarbeitern Dipl.-Ing. P. Bara, Dr.-Ing. K. Eisele und Dr.-Ing. A. Schachenmann.

Mein Dank gilt auch allen Mitgliedern des Lehrstuhls für Strömungsmechanik für ihre stets gewährte Hilfe, insbesondere meinen Kollegen Dipl.-Phys. F. Ernst, Dr. M. Founti, Dr.-Ing. J.C.F. Pereira, Dr.-Ing. J. Völklein und Dr.-Ing. G. Scheuerer.

Fräulein A. Messner danke ich für die sorgfältige Maschinenschrift und Herrn F. Kaschak für die Anfertigung der Zeichnungen.

Erlangen, im Juli 1986

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

VORWORT i

INHALTSVERZEICHNIS iii

ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN v

1. EINLEITUNG 1
   1.1 Problemstellung 1
   1.2 Literaturübersicht 2
   1.3 Eigener Beitrag 8
   1.4 Aufbau und Inhalt der Arbeit 9

2. GRUNDLAGEN 11
   2.1 Grundbegriffe der Laser-Doppler-Anemometrie 11
   2.2 Grundbegriffe der Gradientenindex-Lichtwellenleiter 16
      2.2.1 Begründung des Fasertyps 16
      2.2.2 Grenzen der Lichteinkopplung und Lichtführung 17
      2.2.3 Modenproblematik und kohärente Eigenschaften 20
      2.2.4 Bevorzugte Anregung des Fasergrundmodes durch einen Gauß-Strahl 24

3. MESSTECHNIK 27
   3.1 Laser-Doppler-Optik (Systemteil I) 27
   3.2 Glasfaser-Einkopplung und Sonde (Systemteil II) ... 30
      3.2.1 Einkopplung 30
      3.2.2 Sonde 32
         3.2.2.1 Eigenschaften von Lichtwellenleitern und Sondenauslegung 34
         3.2.2.2 Sondeneinstellung 39
         3.2.2.3 Praktische Sondenrealisierungen 40

Seite

3.3 Empfangseinheit und Signalverarbeitung (Systemteil III) 46
3.3.1 Empfangseinheit 49
3.3.2 Signalverarbeitung 49
3.3.2.1 Einkanalige Counter-Elektronik 50
3.3.2.2 Zweikanalige Counter-Elektronik 55
3.3.3 Streuteilchen 57

4. PRÜFSTÄNDE 68
4.1 Gefeuerter Ottomotor-Prüfstand 68
4.2 Geschleppter Dieselmotor-Prüfstand 77

5. MESSERGEBNISSE 84
5.1 Meßergebnisse im gefeuerten Ottomotor 84
5.2 Meßergebnisse im geschleppten Dieselmotor 93

6. ZUSAMMENFASSUNG 104

LITERATUR 107

ANHANG A: Technische Zeichnungen der Einkopplung

ANHANG B: Zusammenbauzeichnung der Ottosonde

ANHANG C: Zusammenbauzeichnung der Dieselsonde (Prototyp)

ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

ⓐ	Position zwischen Empfangslinse und Photomultiplikator (Bild 1)
AÖ	Auslaß öffnet
AS	Auslaß schließt
$A(r,\psi,z,\lambda)$	Amplitudenverteilung für den Mode ν innerhalb der Faser
b	Bildweite
ⓑ	Position zwischen Laser und Strahlteiler (Bild 1)
c_V	Anzahl der Teilchen pro Volumen
ⓒ	Position zwischen Braggzelle und Sendelinse (Bild 1)
d	Strahlabstand der Sendestrahlen eines Laser-Doppler-Anemometers
d_o	Entfernung der Strahltaille eines einfallenden Gauß-Strahles zur gegenstandsseitigen Brennebene einer Linse (Bild 13)
$d_{o,th}$	theoretischer Wert von d_o
d_1	Entfernung der bildseitigen Brennebene einer Linse zur bildseitigen Strahltaille des transformierten Gauß-Strahles (Bild 13)
$d_{1,th}$	theoretischer Wert von d_1

DMA	Direct Memory Access (Direkter Speicherzugriff)
EMA	Extended Memory Area (erweiterter Adressraum des Computers)
EÖ	Einlaß öffnet
$E(r,\lambda)$	radialer Amplitudenverlauf der transversalen Moden
ES	Einlaß schließt
f	Brennweite einer Linse
f_D	Dopplerfrequenz
f_{L1}	Brennweite der Linse L1
$f_{L1'}$	Brennweite der Linse L1'
f_{Sh}	Shiftfrequenz
f_{Sig}	Signalfrequenz
f_T	interne Taktfrequenz des Counters
f_{th}	theoretische Linsenbrennweite
f_w	normierte Modenausbreitungskonstante
g	Gegenstandweite
H	vertikaler Meßreihenabstand (Bild 52)
HP	Hochpaß

I_{min}	minimale Intensität eines ungefilterten Dopplerbursts bezogen auf die Signalmitte (Bild 3)
I_{max}	maximale Intensität eines ungefilterten Dopplerbursts bezogen auf die Signalmitte (Bild 3)
KW	Kurbelwinkel
L1	Sendelinse (Bild 1, Bild 16)
L1'	alternative Sendelinse
L2	Empfangslinse (Bild 1, Bild 16)
$L3_i$	i-te Auskoppellinse (Bild 16)
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie Laser-Doppler-Anemometer
L_{MV}	Meßvolumenlänge
$L_{MV,E}$	empfangsseitige Meßvolumenlänge
$L_{MV,S}$	sendeseitige Meßvolumenlänge
LP	Modenbezeichnung: linearpolarisiert
m	optischer Abbildungsfaktor
M_E	empfangsseitigs Abbildungsverhältnis
MEAN	mittlere Geschwindigkeit
M_S	sendeseitiges Vergrößerungsverhältnis
n	Drehzahl

n	Brechungsindex
n_a	Brechungsindex in der Umgebung ($n_a \approx 1$)
n_o	Brechungsindex auf der Glasfaserachse bei $r = 0$ (Bild 6)
n_M	Brechungsindex des Fasermantels (Bild 8)
$n(r)$	Brechungsindex in Abhängigkeit vom Faserradius (Bild 6)
n_R	Brechungsindex am Rand des Faserkerns (Bild 8)
$\dot{N}$	Datenrate
NA	Numerische Apertur
N_{fr}	Anzahl der Interferenzstreifen
N_{Sig}	Anzahl der gültigen Doppler-Signalperioden
N_T	Anzahl der Counter-Taktperioden
NTL	negativer Triggerpegel (- 50 mV), (Bild 25)
OK	Oberkante des Kolbens (Bild 42)
OT	oberer Totpunkt einer Kolbenmaschine
PM	Photomultiplikator (Bild 1)
PTL	Positiver Triggerpegel (50 mV), (Bild 25)
r	allgemeiner Faserradius

r_K	Kaustikradius des Fasergrundmodes
r_{Ki}	innerer Kaustikradius eines Modes
r_{Ka}	äußerer Kaustikradius eines Modes
R	Kernradius einer Faser
RMS	Route Mean Square, Schwankungsgeschwindigkeit
S_I	Systemebene I der Sonde (Bild 17): Faseraufnahmeplatte
S_{II}	Systemebene II der Sonde (Bild 17): Auskoppellinsen
S_{III}	Systemebene III der Sonde (Bild 17): Empfangslinse
S_{IV}	Systemebene IV der Sonde (Bild 17): Frontlinse
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
SNR_{L1}	Signal-Rausch-Verhältnis bei einer Sendelinse L1
$SNR_{L1'}$	Signal-Rausch-Verhältnis bei einer Sendelinse L1'
T	Anzahl der Takte eines Verbrennungsmotors (2 oder 4)
TiO_2	Titandioxid
TP	Tiefpaß
U	Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung (Bild 35)
$U_{(1)}$	Geschwindigkeitskomponente in $x_{(1)}$-Richtung Meßfenster 1 (Bild 40)

$U_{(4)}$	Geschwindigkeitskomponente in $x_{(4)}$-Richtung Meßfenster 4 (Bild 40)
$\bar{U}_K$	mittlere Kolbengeschwindigkeit
U_{min}	minimal meßbare Geschwindigkeit mit einer definierten zeitlichen Auflösung bei bestimmter Teilchenrate
UT	unterer Totpunkt eine Kolbenmaschine
v	normierter Frequenzparameter einer Glasfaser
V	Geschwindigkeitskomponente in y-Richtung
$V_{(1)}$	Geschwindigkeitskomponente in $y_{(1)}$-Richtung (Bild 40)
$V_{(4)}$	Geschwindigkeitskomponente in $y_{(4)}$-Richtung (Bild 40)
V_H	Hubvolumen
$\dot{V}_L$	Luftvolumenstrom
$\dot{V}_P$	Volumenstrom der Streuteilchen
V_{1P}	Volumen eines einzelnen Streuteilchens
$V_\perp$	Geschwindigkeitskomponente in der Ebene der Laser-Doppler-Sendestrahlen senkrecht zur optischen Achse
w_o	gegenstandsseitiger Taillenradius eines Gauß-Strahles (Bild 13)
w_1	bildseitiger Taillenradius eines Gauß-Strahles (Bild 13)
w_{L1}	Strahlradius vor der Frontlinse (Bild 17)

Δx	Interferenzstreifenabstand (Bild 2)
Δx_{488}	Interferenzstreifenabstand im Meßvolumen des blauen Strahlenpaars
Δx_{514}	Interferenzstreifenabstand im Meßvolumen des grünen Strahlenpaars
$x_{M'}$	horizontaler Meßreihenabstand (Bild 52)
z	Längskoordinate der Faser
Z	Triggerpegel (20 mV bzw. 0 V), (Bild 25)

Griechische Buchstaben:

α_o	Neigungswinkel eines zentral in die Faser einzukoppelnden Lichtstrahles zur optischen Achse
$\alpha(r)$	Neigungswinkel zur optischen Achse eines in die Faser einzukoppelnden Lichtstrahles in Abhängigkeit vom Faserradius
$\beta(r)$	Neigungswinkel zur optischen Achse eines Lichtstrahles innerhalb der Faser in Abhängigkeit vom Faserradius
Θ	Divergenzwinkel (Halbwinkel eines Lichtstrahles)
Θ_{aus}	Divergenzwinkel (Halbwinkel) eines Laserstrahles am Faseraustritt
$\varepsilon_{5/8}$	Fehler beim 5/8-Vergleich

ε_Q	Quantisierungsfehler
Δ	normierte Brechzahldifferenz einer Glasfaser
η	Modulationsgrad
φ	halber Kreuzungswinkel der Sendestrahlen eines Laser-Doppler-Anemometers
λ	Wellenlänge eines Laserstrahls
ϕ	Azimutalwinkel bei der Beschreibung der Lichtausbreitung in Fasern mittels Zylinderkoordinaten
$\emptyset$	Durchmesser
$\emptyset_{L1}$	Apertur (freier Durchmesser) der Linse L1
$\emptyset_{L2}$	Apertur (freier Durchmesser) der Linse L2
$\emptyset_{L3i}$	Apertur (freier Durchmesser) der Linse $L3_i$
$\emptyset_{MV}$	Meßvolumendurchmesser
$\emptyset_{MV,E}$	empfangsseitiger Meßvolumendurchmesser
$\emptyset_{MV,S}$	sendeseitiger Meßvolumendurchmesser
μ	radiale Modenkennzahl $\mu = 1,2,3,...$
ν	azimutale Modenkennzahl $\nu = 0,1,2,3,4,...$
τ_{Sig}	Doppler-Signalperiode
τ_T	Taktperiode Counter

τ_5	Zeit für fünf Schwingungen
τ_8	Zeit für acht Schwingungen

Indices

o	bezogen auf Faserradius r = 0
O	gegenstandsseitig
1	bildseitig
5	fünf Schwingungen
8	acht Schwingungen
(1)	Meßfenster 1
(4)	Meßfenster 4
1P	Einzelteilchen
5/8	bezogen auf 5/8-Vergleich
aus	Faseraustritt
E	empfangsseitig
fr	Interferenzstreifen
K	Kaustik
K_a	äußere Kaustik
K_i	innere Kaustik

L	Luft
L1	bezogen auf Linse L1
L1'	bezogen auf Linse L1'
L2	bezogen auf Linse L2
L3i	bezogen auf Linse $L3_i$
max	maximal
min	minimal
M	Fasermantel
M'	Meßreihe
MV	Meßvolumen
R	Faserkernradius
S	sendeseitig
Sig	Dopplerfrequenz
$\perp$	senkrecht
th	theoretisch
T	bezogen auf Taktperiode des Counters
V	Volumen

1. EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

Verbrennungsmotoren haben in ihrer mehr als hundertjährigen Geschichte einen hohen technischen Entwicklungsstand erreicht, der sich unter anderem in zuverlässigen Betriebseigenschaften, hoher Leistung bei geringem Eigengewicht und vibrationsarmem Lauf sowie minimiertem Wartungsaufwand äußert. Dies waren die Forderungen, die an Weiterentwicklungen von Verbrennungsmotoren in den letzten Jahrzehnten gestellt wurden. In den letzten Jahren sind noch weitere Forderungen hinzugekommen, die wirtschaftlichen und ökologischen Bedürfnissen Rechnung tragen. Für Verbrennungsmotoren bedeutet dies weitere Optimierungen, um verbesserte Kraftstoffausnutzung, sowie verringerte Emissionen von schädlichen Abgasen und lästigem Geräusch zu erreichen.

Die Lösung der durch die neueren Forderungen gegebenen Probleme scheint nur möglich durch Verstehen der in Verbrennungsmotoren gekoppelt ablaufenden, hochkomplizierten Transportvorgänge von Wärme, Stoff und Impuls. Diese Transportvorgänge lassen sich mathematisch durch allgemeingültige Erhaltungsgesetze formulieren, die ein System von nichtlinearen Differentialgleichungen höherer Ordnung bilden. Dieses Gleichungssystem läßt sich im allgemeinen nicht geschlossen lösen. Es sind jedoch Differentialgleichungen für gemittelte Strömungsgrößen angebbar, die in Verbindung mit Turbulenzmodellen Lösungen technischer Strömungen zulassen. Diese numerischen Näherungsverfahren benötigen jedoch zusätzliche Angaben über charakteristische Transportkenngrößen, welche nur über verläßliche Messungen mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit angegeben werden können.

Um die hochturbulenten Strömungsvorgänge in Verbrennungsmotoren quantitativ erfassen zu können, bietet sich die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) an, die mit Hilfe von kohärentem Laserlicht direkt, störungsfrei und ohne verschleißgefährdete Meßaufnehmer

die Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten, auch bei Verbrennung, sowie bei hohen Strömungsdrücken und Strömungstemperaturen gestattet. Dies erklärt, daß die Laser-Doppler-Anemometrie in den letzten Jahren verstärkt Beachtung in der Motorenentwicklung gefunden hat, nachdem schon vor Jahren in verschiedenen Forschungsgruppen des In-und Auslandes deren Anwendbarkeit für Geschwindigkeitsmessungen im Motor nachgewiesen worden war.

Die außerhalb der hier beschriebenen Forschungsbemühungen durchgeführten Untersuchungen zeichnen sich zumeist dadurch aus, daß konventionelle LDA-Optiken Einsatz finden, die durch große Dimensionen gekennzeichnet sind. Neben dem hohen Platzbedarf dieser Optiken und den damit eng verbundenen großen und aufwendigen Traversiervorrichtungen, erfordert die konventionelle Meßtechnik bei rauhen Umgebungsbedingungen, zumindest für einige Optiken, auch regelmäßig zeitraubende Justageprozeduren. Dies und die mangelnde Verfügbarkeit leistungsstarker kommerzieller LDA-Sonden gaben Anlaß zu den Entwicklungsarbeiten, die in der vorliegenden Arbeit beschrieben sind.

1.2 Literaturübersicht

Aus den Darstellungen des Abschnitts 1.1 klang an, daß der Wunsch nach optimierten Verbrennungsmotoren fast so alt ist wie die Motoren selbst. Es bestehen auch schon seit langem Bemühungen, solche Verbesserungen über die Optimierung der Ladungsbewegung zu erzielen. Die frühen Arbeiten von Clerk /1/, Ricardo /2/ und Alcock /3/ zeigten, wie durch veränderte Luft- und Ladungsbewegung im Zylinder der Verbrennungsvorgang verbessert werden kann. Der positive Einfluß der Strömungsparamter auf die Treibstoffdurchmischung und die Verbrennungsdauer erlaubte die Anwendung höherer Verdichtungsverhältnisse und magerer Kraftstoff-Luft-Gemische, was zu erhöhter Motorleistung und reduzierter Schadstoffemission führte. Das Verständnis der qualitativen Zu-

sammenhänge zwischen dem Strömungsfeld vor der Verbrennung und der eigentlichen Verbrennung resultierte in jenen halbempirischen Auslegungsprinzipien, welche auch noch die heutige Motorenentwicklung kennzeichnen und beeinflussen. Weitere Verbesserungen können nur durch ein detaillierteres Verständnis des Verbrennungsablaufes und dessen Einflußparameter erreicht werden, was sowohl die experimentellen als auch die theoretischen Methoden betrifft.

Detaillierte Motorenmessungen sind mit der Verfügbarkeit einer räumlich und zeitlich hochauflösenden Geschwindigkeitsmeßtechnik verknüpft. Semenov /4/ berichtete 1963 erstmals über die Anwendung eines Hitzdrahtanemometers zur Messung der Ladungsbewegung im Zylinder einer geschleppten Kolbenmaschine. Lokale Werte des Mittelwertes und des Effektivwertes der Schwankungsgeschwindigkeit werden kurbelwinkelaufgelöst angegeben. Die erhaltenen Ergebnisse sind jedoch nicht leicht hinsichtlich verläßlicher lokaler Geschwindigkeitswerte interpretierbar, da vom Hitzdraht außer Geschwindigkeits- auch Temperatur- und Dichteänderungen registriert werden. Gerade in Verbrennungsmotoren machen sich die Nachteile der Hitzdrahtanemometrie stark bemerkbar, siehe Witze /5/, so daß folgende Nachteile festgehalten werden können:

- o Beeinflussung der Strömung durch den Meßaufnehmer;
- o Empfindlichkeit des Aufnehmers gegen Verunreinigung;
- o Indirekte Messung der Geschwindigkeit, d.h. Eichung des Aufnehmers erforderlich;
- o Starke Abhängigkeit des Meßwertes von Druck und Temperatur, d.h. grobe Meßfehler in Kompressions- und Expansionstakten;
- o Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Schwankungsgeschwindigkeit;

- o i.a. Beschränkung auf Messungen in jenem Totraum des Brennraumes, der von Kolben und Ventilen nicht überstrichen wird;

- o Erweiterung der Anwendbarkeit auf gefeuerte Motoren nicht möglich.

Eine zusammenfassende Darstellung klassischer Motorenmeßverfahren, die ohne Laser auskommen, wurde von Amann /6/ angegeben. Aus dieser Darstellung werden die Nachteile klassischer Sondenmeßverfahren ersichtlich.

Die von Yeh und Cummins /7/ erstmals vorgestellte Laser-Doppler-Anemometrie kannte keinen dieser Nachteile und stellte somit ein revolutionäres Geschwindigkeitsmeßverfahren in der Strömungsmechanik dar. Neue Wege bei der Komponentenauswahl und dem Komponentendesign vereinfachten die Justierung und die Stabilität des optischen Aufbaus, wodurch die Laser-Doppler-Anemometrie nicht nur im Labor, sondern in vielen industriellen Strömungen praxisnah angewandt werden konnte. Im Zuge dieses Praxistransfers hielt die optische Meßtechnik auch ihren Einzug in die Verbrennungsmotorenuntersuchung, wobei zunächst der optische Zugang zum Brennraum und dessen Verschmutzung, sowie die Streuteilchenzugabe und das Signalauswerteverfahren im Vordergrund standen. Erst nach der Energiekrise 1973/74 wurden die Untersuchungen der Strömungs- und Verbrennungsvorgänge in Verbrennungsmotoren mit dem neuen Meßverfahren verstärkt aufgenommen, insbesondere in Großbritannien und den USA.

Mit der Entwicklung einsatzfähiger LDA-Systeme, siehe Durst /8/, und nach den Pionierarbeiten von Trolinger et al. /9/ und ersten systembezogenen Entwicklungsarbeiten von Melling und Whitelaw /10/ begann die Laser-Doppler-Anemometrie alle konkurrierenden Geschwindigkeitsmeßverfahren auf dem Motorensektor zu verdrängen. In Großbritannien befaßten sich mit Untersuchungen in Verbrennungsmotoren unter anderem das Atomic Energy Research Establish-

ment (AERE) in Harwell /11/, sowie auch die Gruppe von Prof. Whitelaw am Imperial College of Science and Technology in London. In der letztgenannten Gruppe entstanden umfassende Messungen /12/ über den Geometrieeinfluß einzelner Motorkomponenten und über den Einfluß von Motorparametern /13/ auf das Strömungsfeld geschleppter Motoren und die dazugehörige Modellierung in Strömungsberechnungen /14/. Eine Zusammenfassung über den Kenntnisstand des Strömungsvorganges innerhalb des Zylinders und der dazugehörigen experimentellen und numerischen Methoden liefert /15/. Ähnliche Strömungsberechnungen werden auch von UMIST in Manchester vorgenommen. Als Industriefirma befaßte sich das Thornton Research Center der Shell Research LTD in Chester mit meßtechnischen Untersuchungen der Strömungsvorgänge in Motoren /16/ und speziell mit der Untersuchung der zyklischen Schwankungen in Motoren /17/ und /18/.

In den USA beschäftigen sich verschiedene Gruppen mit der Erforschung von Verbrennungsvorgängen. Zu nennen sind hier die Sandia Laboratories in Livermore, Kalifornien, sowie die Universitäten von Stanford und Princeton. Neben Grundlagenuntersuchungen in einer Verbrennungsbombe /19/ wurden Turbulenzuntersuchungen /20/ und -berechnungen /21/ in gefeuerten Verbrennungsmotoren durchgeführt. Darüber hinaus wurden von der Motorengruppe der Sandia Laboratories ein Auswerteverfahren entwickelt, um zyklische Schwankungen von turbulenten Schwankungen unterscheiden zu können /22/. Für bestehende LDA-Systeme wurden verschiedene Detaillösungen zu Problemen erarbeitet, welche die Anwendung der Laser-Doppler-Anemometrie auf Motoren heute erleichtern, siehe z.B. /23/. Eine zusammenfassende Darstellung der modernen laseroptischen Meßverfahren in Motoren liefert /24/.

Die Untersuchung der turbulenten Strömungsvorgänge sowie deren Einfluß auf die turbulente Flammenstruktur wird verstärkt auch an der Princeton-Universität vorangetrieben /25/. Daraus resultieren neue Ansätze, die in zukünftigen Berechnungsmodellen für Strömungs- und Verbrennungsvorgänge in Motoren Beachtung finden soll-

ten. Auf der Firmenseite unterhält z.B. General Motors Entwicklungslabors in Warren, Michigan, die sich ebenfalls mit Laser-Doppler-Messungen in Verbrennungsmotoren /26/ und den dazugehörigen speziellen Signalauswerteverfahren beschäftigen /27/.

Weit vorangeschritten ist die Motorenmeßtechnik ebenfalls bei der Firma VOLVO in Schweden. Dort werden kurbelwinkelaufgelöste Messungen in gefeuerten Motoren in verschiedenen Forschungsprogrammen vorgenommen, wobei die Auswertung mit Photonkorrelator erfolgt /28/; Counterauswertungen der LDA-Signale werden in Erwägung gezogen.

Die AVL in Graz befaßt sich schon seit Jahren mit der Entwicklung angepaßter auf rotierendem Beugungsgitter basierender Laser-Doppler-Optiken /29/ und deren Anwendung auf Verbrennungsmotoren /30/. Drallluntersuchungen im Dieselmotor sowie Erweiterung auf mehrdimensionale Messungen stehen neben den Strömungsberechnungen im Vordergrund.

In Japan werden seit der Gründung des Laser-Combustion Diagnostic Committees ebenfalls verstärkte Bemühungen unternommen, die Lasermeßtechnik auf Motoren anzuwenden, sowie die dazugehörige Strömungsmodellierung vorzunehmen bzw. weiterzuentwickeln. Bezüglich der Anwendung in Verbrennungsmotoren sehr weit fortgeschritten sind die Untersuchungen an der Universität Okayama /31/, bei der Verbrennungsmodellierung die Untersuchungen der Universität Hiroshima /32/. Auf Firmenseite berichtet Toyota über Drallströmungsmessungen in Verbrennungsmotoren /33/. Es werden sogar bereits neuentwickelte faseroptische Laser-Doppler-Anemometer eingesetzt, um in Verbrennungsmotoren die Strömungsgeschwindigkeit zu bestimmen /34/. Umfangreichere Untersuchungen beschränken sich zumeist auf geschleppte Motoren; die entsprechenden Messungen im gefeuerten Motor befinden sich noch in der Anfangsphase.

An Hochschulen der Bundesrepublik Deutschland arbeiten verschiedene Gruppen an der meßtechnischen Erfassung des Verbrennungsvor-

ganges mittels laseroptischer Verfahren. Die Lehrstühle für Angewandte und für Technische Thermodynamik in Aachen unter der Leitung von Prof. Pischinger und Prof. Knoche beschäftigen sich mit laseroptischen Verfahren zur Geschwindigkeitsmessung und Flammenpositionserfassung in Dieselmotoren. Im geschleppten Motor wird die 1° Kurbelwinkel(KW)-Auflösung erreicht, während am gefeuerten realen Motor während der Verbrennung diese Auflösung nur durch Mittelung über mehrere Motorzyklen erzielt wird.

Der Lehrstuhl für allgemeine Mechanik in Aachen unter der Leitung von Prof. Adomeit untersucht den zeitaufgelösten Verbrennungsvorgang in einem gefeuerten einhubigen Kolbentriebwerk mit Hilfe eines zweikomponentigen Laser-Doppler-Anemometers. Eine aufwendige Signalverarbeitung mittels zweier Counter und eine Datenzwischenspeicherung mit einem schnellen Transientenrekorder gestatten die Meßwerterfassung mit einer Datenrate bis etwa 70 kHz in einem Meßpunkt.

Die Motorengruppe von Prof. Durst am Lehrstuhl für Strömungsmechanik in Erlangen entwickelt motorenangepaßte Laser-Doppler-Anemometer und setzt diese an geschleppten /35/ und gefeuerten /36/ Ottomotoren und an geschleppten Dieselmotoren /37/ ein.

Seitens der deutschen Automobilindustrie wird die Laser-Doppler-Anemometrie von VW in Wolfsburg, Daimler-Benz in Stuttgart, und dem IMH in München angewandt. VW fährt Messungen am geschleppten Motor, wobei die 1° KW-Auflösung im Mittel erreicht wird. Daimler Benz gelingen Messungen am direkt einspritzenden Dieselmotor im interessierenden Bereich kurz vor Einspritzbeginn mit einer zeitlichen Auflösung von 2° - 3° KW.

Die DFVLR in Stuttgart plant in einem Jahr mit Unterstützung der Firma Daimler Benz die systematische Erprobung aller erdenklichen optischen Meßverfahren zunächst einzeln, später auch simultan, um an zwei flexiblen Daimler Benz Versuchsmotoren Geschwindigkeits- sowie Temperatur- und Konzentrationsfelder erfassen zu können.

IMH in München unternimmt zur Zeit ebenfalls große Anstrengungen mit der Laser-Doppler-Anemometrie und flankierenden Meßverfahren, den Einfluß der Ladungsbewegung auf die Flammenausbreitung erfassen zu können.

1.3 Eigener Beitrag

Konventionelle LDA-Systme erfordern einen relativ großen Freiraum rund um Motorenprüfstände, der jedoch oftmals in der Praxis nur begrenzt zur Verfügung steht. Ferner benötigen konventionelle Systeme große Traversiervorrichtungen, was bei einem Wechsel des Versuchsträgers oder bei Veränderungen am Versuchsträger die Flexibilität der gesamten Meßtechnik einschränkt. Außerdem harmonieren rauhe Umgebungsbedingungen rund um Motorenprüfstände nur bedingt mit der empfindlichen Lasermeßtechnik, weshalb regelmäßig zeitraubende Justageprozeduren notwendig sind. In jüngster Zeit gibt es zwar kommerzielle Entwicklungen auf Laserdiodenbasis, die von vornherein für industrielle Anwendungen konzipiert wurden, jedoch besitzen diese zum heutigen Zeitpunkt noch keine ausreichende optische Empfindlichkeit und räumliche Auflösung, wie sie für Gasgeschwindigkeitsmessungen mit kleinen Streuteilchen erforderlich sind.

Um die beiden negativen Eigenschaften der Baugröße und des Justageaufwandes konventioneller Laser-Doppler-Anemometer für praktische Messungen in Verbrennungsmotoren zu eliminieren, stellt die vorliegende Arbeit neuartige, leistungsstarke LDA-Meßsonden in zwei verschiedenen Baugrößen vor, die sich im optischen Aufbau und im Leistungsvermögen erheblich von bekannten Sonden /38/ unterscheiden. Diese Meßköpfe kommunizieren über Gradientenindexglasfasern mit einer konventionellen Laser-Doppler-Optik, deren Betriebsbedingungen sich durch die räumliche Trennung vom Prüfstand stark verbessern. Die Meßköpfe besitzen einen robusten Aufbau bei vergleichsweise geringer Baugröße. Die robuste Konstruktion vermeidet nach einmaliger richtiger Justage und

Fixierung der vorgenommenen Einstellung notwendige Nachkorrekturen, welche durch den Transport oder durch rauhe Umgebungsbedingungen vor Ort verursacht werden können. Sogar die Justage der konventionellen Optik vereinfacht sich stark, da der Abgleich nicht mehr auf räumliche Koinzidenz und Sende- und Empfangsstrahltaillen erfolgt, sondern nur noch nach Intensität und Strahlenbild. Die Entwicklung zweier Meßsysteme für Otto- und für Dieselmotoren und deren Anwendung für erste Messungen sind das erklärte Ziel dieser Arbeit.

1.4 Aufbau und Inhalt der Arbeit

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Weiterentwicklung der Laser-Doppler-Anemometrie, um angepaßte Endsysteme für Geschwindigkeitsmessungen in Verbrennungsmotoren zu erhalten. Anwendungen solcher Systeme für erste Messungen in geschleppten und gefeuerten Motoren sollen die Nützlichkeit der Entwicklung bestätigen und im nachhinein den damit verknüpften Aufwand rechtfertigen.

Ausgehend von einer Einführung in die Problematik der Motorenforschung behandelt Kapitel 1 den Stand der Technik auf dem Gebiet der Geschwindigkeitsmessungen in Verbrennungsmotoren. Nach einer Abgrenzung und Begründung des Beitrages dieser Arbeit führt eine Inhaltsskizze in den Aufbau der gewählten Darstellungen ein, damit vor einem Einblick in Detailprobleme ein globaler Überblick des Lösungsweges zum besseren Verständnis der Arbeit beiträgt.

Kapitel 2 vermittelt nach einer kurzen Einführung in die Grundlagen der Meßtechnik die wichtigsten Auslegungs- und Berechnungsprinzipien, wie sie zum Erstellen und zum Verstehen von Laser-Doppler-Sonden, wie von kompletten Endsystemen notwendig erscheinen.

Kapitel 3 präsentiert das bei den Motorenmessungen eingesetzte Laser-Doppler-System mit zwei entwickelten Sondenköpfen und der Signalverarbeitungselektronik. Der Problematik der Streuteilchen ist dabei ein eigener Abschnitt gewidmet.

Kapitel 4 beschreibt zwei Prüfstände, einer mit gefeuertem Ottomotor und ein zweiter mit geschlepptem Dieselmotor, an denen das Laser-Doppler-System mit der jeweiligen Sonde Einsatz fand.

Die aus diesem Einsatz entstandenen Messungen sind in Kapitel 5 beschrieben und diskutiert. Diese Messungen bestätigen einerseits die positiven Eigenschaften des entwickelten Anemometers und sorgen ferner für erste Informationen, die in Strömungsmodellen Berücksichtigung finden können.

Abschließend schlagen die in Kapitel 6 vorgetragenen zusammenfassenden Bemerkungen über das Ziel der Arbeit hinaus Anregungen über zukünftig wünschenswerte Forschungsarbeiten vor, welche andeuten, daß trotz einer Vielzahl von Forschungsbemühungen auf dem Verbrennungsmotorensektor noch ein weites Feld für zukünftige Untersuchungen verbleibt.

2. GRUNDLAGEN

Geschwindigkeitsmessungen in Verbrennungsmotoren erfordern leistungsstarke Laser-Doppler-Anemometer, die im Rückstreuverfahren arbeiten und bestmögliche Signal-Rausch-Verhältnisse gewährleisten, da die Signalqualität in gefeuerten Motoren wesentlich unter der von Freistrahlversuchen liegt. Die Anwendung von Glasfasern erlaubt andererseits den Aufbau und Betrieb kleiner, stabiler Sondenköpfe räumlich getrennt vom Rest der empfindlichen Laser-Optik.

Die Pionierarbeit auf dem LDA-Sondensektor ist in /38/ angegeben. Die verwendeten Monomodefasern sorgen jedoch für eine unerwünschte Limitierung der übertragbaren Laserleistung. Untersuchungen der thermischen Belastbarkeit kommerziell erhältlicher Lichtleiter ergaben, daß Monomodefasern mit einem Kerndurchmesser von etwa 5 µm nur maximal 400 mW Ausgangsleistung auf Dauer übertragen können /39/. Gradientenindexglasfasern mit 50 µm Kerndurchmesser bereitet dagegen auch eine Übertragung von 4 W Laserleistung keine Probleme. Nachdem andererseits die Anwendbarkeit der Gradientenindexfasern für die Laser-Doppler-Anemometrie feststand /40/, wurden diese Fasern für die vorliegende Arbeit bevorzugt. Diese mehr als drei Jahre alte Entscheidung hat auch heute noch ihre Berechtigung, nachdem selbst neuere kommerzielle Monomodesonden im direkten Vergleich das Signal-Rausch-Verhältnis der vom Autor dieser Arbeit entwickelten "inkohärenten" Hochleistungssonden nicht erreichen.

2.1 Grundbegriffe der Laser-Doppler-Anemometrie

Dieser Abschnitt faßt die wichtigsten Grundlagen der Laser-Doppler-Anemometrie /41/ zusammen, um darauf aufbauend in deren Ausbau für Anwendungen in Verbrennungsmotoren einzuführen. In Motoren kommen nur Rückstreusysteme in Frage, da diesen Systemen ein Sichtfenster zum Brennraum genügt. Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines einkanaligen Anemometers in Rückstreuung.

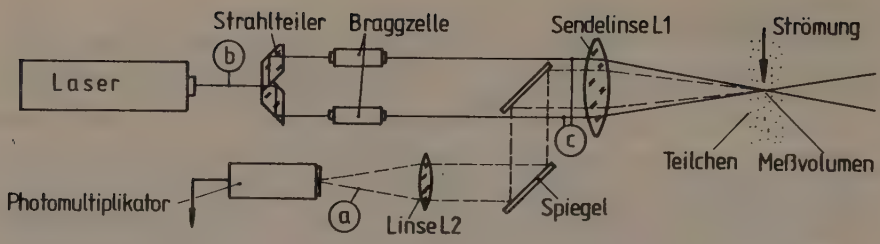


Bild 1: Prinzipskizze eines einkanaligen Zweistrahlanemometers in Rückstreuung

Aus Leistungsgründen erfordern Rückstreusysteme meist Argon-Ionen-Laser. Der linearpolarisierte Lichtstrahl eines solchen Lasers teilt sich in einem speziellen Strahlteilerprisma in zwei parallele Teilstrahlen gleicher Intensität auf. Diese passieren jeweils eine Braggzelle, um die Lichtfrequenz der beiden Strahlen gegeneinander zu verschieben. Die Sendelinse L1 sorgt für einen idealen Schnitt der beiden frequenzverschobenen Strahlen in ihren Strahltaillen, vgl. Bild 2.

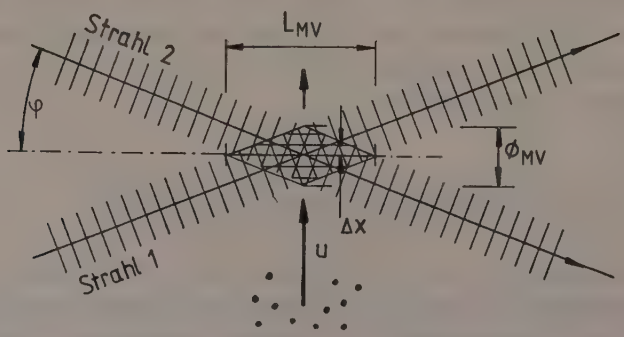


Bild 2: Prinzipielle Momentanaufnahme des Meßvolumens

Dieser Kreuzungspunkt stellt das Meßvolumen dar, in dem man sich zufolge der Frequenzverschiebung ein laufendes Interferenzstreifensystem vorstellen kann. Der Abstand Δx zweier Interferenzstreifen liegt durch den halben Schnittwinkel φ und durch die Laserwellenlänge λ fest, gemäß Gleichung (1)

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \varphi} \tag{1}$$

Fliegt ein in der zu untersuchenden Strömung mitgeführtes Teilchen durch das Meßvolumen, so streut es abhängig von seiner Geschwindigkeitskomponente $V_\perp$ und der festen Shiftfrequenz f_{Sh} durch Überqueren des Interferenzstreifenmusters eine Frequenz f_{Sig}, gemäß Gleichung (2)

$$f_{sig} = \pm f_D + f_{sh} \tag{2}$$

Dabei existiert ein linearer Zusammenhang zwischen der Dopplerverschiebung f_D und der empfindlichen Geschwindigkeitskomponente $V_\perp$, siehe Gleichung (3)

$$V_\perp = \Delta x \cdot f_D \tag{3}$$

Die meßtechnische Erfassung der Signalfrequenz f_{Sig} gestattet damit die Bestimmung des dopplerverschobenen Anteils, woraus sich $V_\perp$ berechnen läßt. Diese Geschwindigkeitskomponente liegt in der Ebene der das Meßvolumen erzeugenden Strahlen und senkrecht zur optischen Achse. Die Streulichtdetektion erfolgt bei Rückstreusystemen entgegen der Richtung der Sendestrahlen, also rückwärts durch die gleiche Linse L1. Dadurch wird das bei Vorwärtsstreuung notwendige zweite Sichtfenster in die Strömung eingespart. Nach Herausspiegeln aus der optischen Achse fokussiert die Linse L2 das parallele Streulicht auf das Pinhole des Photomultiplikators, wo die Wandlung zu einem elektrischen Signal durchgeführt wird. Dieses Signal, auch Burst genannt, setzt sich aus dem Signalgleichanteil und dem Nutzanteil zusammen, siehe Bild 3.

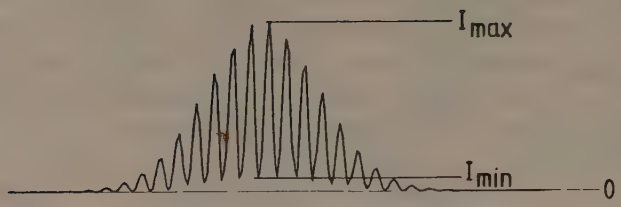


Bild 3: Ungefiltertes Laser-Doppler-Signal

Der in Gleichung (4) angegebene Modulationsgrad η stellt ein Intensitätsverhältnis dar und charakterisiert neben dem Signal-Rausch-Verhältnis die Qualität eines Doppler-Signals:

$$\eta = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \qquad (4)$$

Eine Auswertung dieses Signals mit Zähltechniken erfordert eine zuvorige Bandpaßfilterung, um den Gleichanteil zu beseitigen und das Signal symmetrisch zur Nullinie zu gestalten, wie es in Bild 4 gezeigt ist.

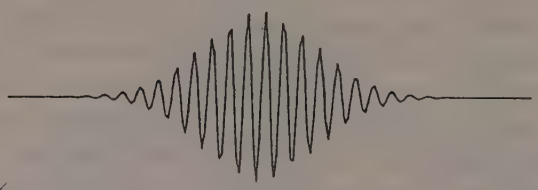


Bild 4: Bandpaßgefiltertes Laser-Doppler-Signal

Das in Bild 1 gezeigte und daraufhin beschriebene konventionelle Laser-Doppler-Anemometer weist charakteristische Außenabmessungen von etwa 2 m x 0.5 m x 0.3 m auf, was die Unterbringung neben Motorprüfständen erschwert, da zudem schwere Traversiervorrichtungen Platz finden müssen. Hinzu kommen eventuell erforderliche Nachjustierungen, um den Einfluß rauher Umgebungsbedingungen zu kompensieren. Durch den Einsatz von Glasfasern, sinnvoll an den in Bild 1 markierten Orten ⓐ, ⓑ oder ⓒ, lassen sich der Laser und weitere Komponenten vom Motorprüfstand getrennt betreiben, was deren Justage langzeitstabiler und die am Meßort benötigte Meßtechnik handlicher und kompakter ausfallen läßt. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Glasfasereinsatz an der Stelle ⓒ, um möglichst viele Komponenten erschütterungsarm betreiben zu können, vgl. Bild 5.

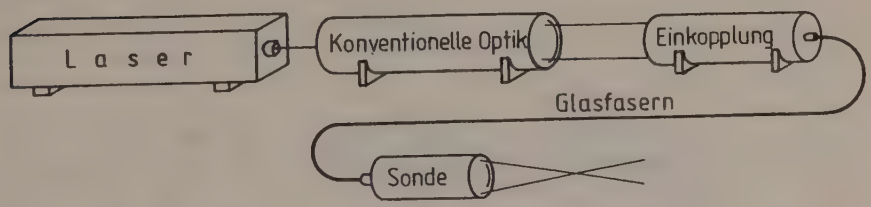


Bild 5: Integration der Glasfasern im Gesamtkonzept der Optik

Bei Glasfaseroptiken ersetzt die Einkopplung mit Glasfasern und Meßkopf im wesentlichen nur die Frontlinse eines konventionellen Rückstreusystems.

2.2 Grundbegriffe der Gradientenindex-Lichtwellenleiter

2.2.1 Begründung des Fasertyps

Nach den obigen Ausführungen können der Justagestabilität von LDA-Optiken abträgige Umgebungsbedingungen oder auch die schlechte Zugänglichkeit von Meßstrecken den Einsatz von Glasfaser-LDA-Sonden erfordern, um zuverlässige Laser-Doppler-Messungen durchzuführen. Die Durchführung erfolgreicher Laser-Doppler-Messungen erfordert den Einsatz besonderer Sonden, die es erlauben, daß hohe Laserleistungen bei guter Erhaltung der Kohärenz über die eingesetzten Glasfasern übertragen werden können. Von den drei zur Auswahl stehenden Fasertypen, vgl. Bild 6, erfüllen nur die Monomodefasern und die Gradientenindexfasern diese Voraussetzungen.

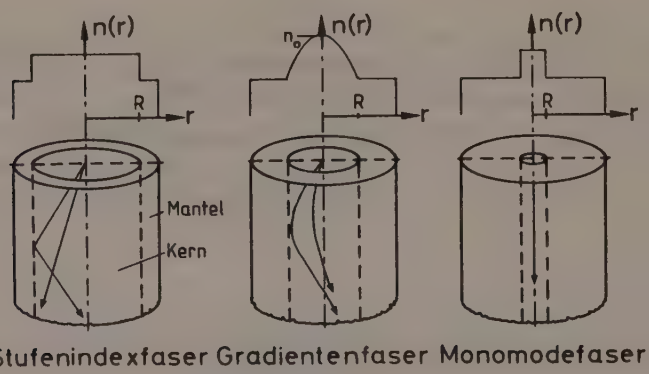


Bild 6: Glasfasertypen

Die Stufenindexfaser bewirkt eine starke Pulsverbreitung aufgrund von Laufzeiteffekten (Dispersion), so daß die ursprüngliche Kohärenz bei einem Laser schon nach kurzer Laufstrecke durch die Faser völlig verloren geht. Die Monomodefaser bietet dagegen geringste Laufzeitstreuungen und damit beste Kohärenzbeständig-

keit, jedoch ist die übertragbare Laserleistung aufgrund des kleinen Faserkerndurchmessers von etwa 5 µm vergleichsweise gering. Gradientenindexfasern stellen in Bezug auf Kohärenzerhaltung und Laserleistungsübertragung einen Kompromiß dar, da sie es erlauben, bei erträglichem Kohärenzverlust, hohe Laserleistungen zu übertragen. Der Faserkerndurchmesser 2R beträgt etwa 50 µm, die numerische Apertur NA liegt nahe bei 0,2, wobei NA über den Einfallswinkel α_o definiert ist:

$$NA = \sin \alpha_0 = \sqrt{n_0^2 - n_R^2} \tag{5}$$

Da die optische Übertragungsqualität durch eine geeignete Einkopplung in die Faser positiv beeinflußt werden kann, lohnt sich ein Einblick in die Fasertheorie und in die Modenproblematik, um aus der Vielzahl möglicher Einkopplungen diejenige herauszufinden, die einen optimalen Betrieb der Fasersonden für Laser-Doppler-Messungen ermöglicht.

2.2.2 Grenzen der Lichteinkopplung und Lichtführung

Wie in Bild 6 angedeutet, verlaufen in Multimodefasern die Lichtstrahlen (Moden) auf verschieden stark zur Achse geneigten Bahnen. Dadurch tritt eine Modendispersion auf, welche durch Wahl eines parabolischen Brechungsindexprofiles n(r) über dem Faserdurchmesser reduziert werden kann:

$$n^2(r) = n_0^2 - NA^2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 \tag{6}$$

Hierbei bezeichnet n_o den Brechungsindex auf der Faserachse und NA die in Gleichung (5) definierte numerische Apertur. Eine gemessene Brechzahlverteilung /42/ zeigt Bild 7.

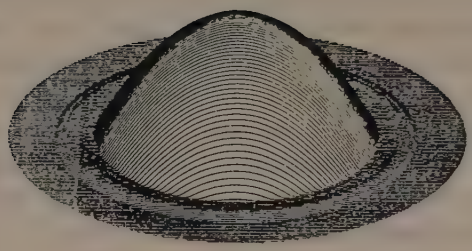


Bild 7: Brechungsindexverteilung einer Gradientenindexfaser

Das Brechungsgesetz von Snellius beschreibt mit Gleichung (7), welche Neigungswinkel $\beta(r)$ innerhalb der Faser bei gegebenem Einkopplungswinkel $\alpha(r)$ auftreten; somit beschreibt es auch den Einkopplungsvorgang in die Faser, vgl. dazu auch Bild 8. Unter Vernachlässigung des Brechungsindizes der Umgebung ($n_a = 1$) lautet der Einkoppelzusammenhang gemäß Bild 8 und Gleichung (7):

$$\sin\alpha(r) = n(r)\sin\beta(r) \tag{7}$$

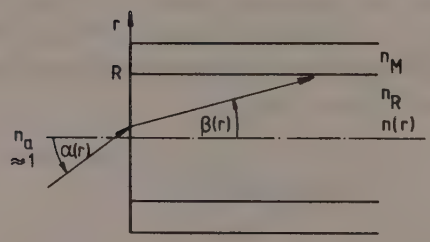


Bild 8: Allgemeine Fasereinkopplung

Bei Gradientenindexfasern läßt sich nicht nur die Lichteinkopplung, sondern auch die Lichtausbreitung in der Faser mit dem Brechungsgesetz von Snellius beschreiben. Wegen gleicher Winkelbezeichnungen wie bei der Einkopplung bei um 90° gedrehter Brechungsfläche, tritt hier allerdings die Cosinus- statt der Sinus-Funktion auf, siehe Gleichung (8):

$$n(r)\cos\beta(r) = \text{const} \tag{8}$$

Da für leckwellenarme* Lichtführung $\beta(r = R)$ verschwinden muß, gilt Gleichung (9):

$$n(r)\cos\beta(r) = n_R \tag{9}$$

Durch Einsetzen von Gleichung (9) in Gleichung (7) entsteht ein Ausdruck für die leckwellenfreie Einkopplung:

$$\sin\alpha(r) = \sqrt{n^2(r) - n_R^2} \tag{10}$$

Die Gleichung (10) gilt allgemein für Fasern mit beliebigem Brechungsindexprofil $n(r)$. Für den Fall der zentralen Einkopplung bei $r = 0$ entsteht daraus die Definitionsgleichung einer charakteristischen Faserkerngröße, der Numerischen Apertur NA, siehe Gleichung (5).

Bei exzentrischer Einkopplung mit $r \neq 0$ folgt für Gradientenfasern mit parabolischem Brechungsindexprofil mit Gleichung (6) und Gleichung (10) nach kurzer Rechnung eine Beziehung gemäß Gleichung (11):

$$\sin^2\alpha(r) = NA^2\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \tag{11}$$

---

* Der Begriff 'leckwellenarm' deutet an, daß durch die endlichen Faserabmessungen bzw. durch Faserkrümmungseffekte auch theoretisch in der Faser geführte Moden aus der Faser wieder austreten können.

Diese für "schwachführende" Fasern $\Delta \ll 1$ geltende Beziehung verdeutlicht, daß der Akzeptanzwinkel nur in Fasermitte den Wert der numerischen Apertur erreicht und zum Rand des Faserkerns hin auf Null abfällt. Bild 9 veranschaulicht diesen Zusammenhang durch ein Phasenraumdiagramm /43/.

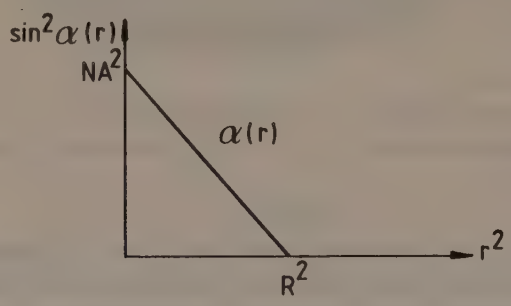


Bild 9: Akzeptanzgrenzen der Gradientenindexfaser im Phasenraumdiagramm

2.2.3 Modenproblematik und kohärente Eigenschaften

Innerhalb der bisher beschriebenen leckwellenarmen Einkopplung gelingt es, den Laserstrahl mit Kopplungswirkungsgraden bis zu etwa 70% in die Faser einzukoppeln. Allerdings werden im allgemeinen viele Fasermoden etwa leistungsgleich angeregt, die sich am Faseraustritt als typisches Speckle-Pattern zeigen.

Die Entstehung dieses Speckle-Pattern am Austritt von Lichtwellenleitern kann, wie alle Lichtausbreitungseffekte, durch Anwendung der Maxwell'schen Gleichungen beschrieben werden. Bei kleinen normierten Brechzahldifferenzen Δ, wie sie bei schwach führenden Fasern auftreten, können Lichtwellenleiter als quasihomogen betrachtet werden, obwohl sie eigentlich inhomogene optische Medien sind.

$$\Delta = \frac{n_0^2 - n_a^2}{2 n_0^2} \approx \frac{n_0 - n_a}{n_0} \ll 1 \tag{12}$$

Dann reduzieren sich die Maxwell-Gleichungen auf die wesentlich einfachere skalare Wellengleichung. Die Eigenlösungen dieser Gleichung sind sehr gute Näherungen für die ausbreitungsfähigen Lichtwellen in Fasern und werden Eigenwellen oder Moden genannt. Diese Eigenwellen haben ebene Phasenflächen, sind linear polarisiert und werden als LP$\nu\mu$-Moden bezeichnet, wobei $\nu = 0,1,2,3,...$ die azimutale und $\mu = 1,2,3,4,...$ die radiale Modenkennzahl darstellen. Bei rotationssymmetrischen Brechzahlprofilen lautet die Amplitudenverteilung der Moden in Zylinderkoordinaten /44/:

$$A(r,\psi,z,\lambda) = E(r,\lambda)\cdot\cos(\nu\cdot\psi)\cdot e^{-j\beta(\lambda)\cdot z} \tag{13}$$

Hierbei bezeichnet $\psi \in [0, 2\pi]$ den Azimutalwinkel.

Gemäß Gleichung (13) besitzt die Amplitudenverteilung der Moden am Umfang zwei ν äquidistante Nullstellen. Für jeden Wert von ν existieren nach Gleichung (13) mehrere Moden mit unterschiedlichem radialen Amplitudenverlauf. Diese radialen Moden unterscheiden sich durch eine unterschiedliche Anzahl konzentrischer Ringe, siehe Bild 10.

Bild 10: Die ersten zehn LPνμ-Moden eines Lichtwellenleiters nach /44/

Die Moden entstehen also durch konstruktive und destruktive Interferenzen von Vielfachreflexionen und Vielfachbrechungen eingekoppelter Lichtstrahlen innerhalb der Faser. Die Ausbreitung des innerhalb der Moden transportierten Lichts kann durch Reflexionen an den modenbezogenen zylindrischen Kaustikflächen mit den Radien r_{Ki} und r_{Ka} erklärt werden. Dabei windet sich der jeweilige Lichtstrahl schraubenförmig mit wechselndem Abstand um die Faserachse /44/, vgl. Bild 11.

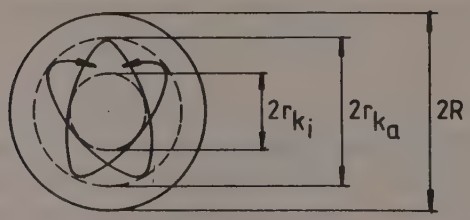


Bild 11: Strahlbahn und Kaustiken r_{Ki} und r_{Ka} im Kern einer Gradientenfaser von der Faserstirnseite aus gesehen

Es resultiert am Faserausgang eine komplizierte, von der Faserbewegung abhängige räumliche Lichtverteilung, ähnlich Bild 12, die sich aus den unterschiedlichen transversalen Moden zusammensetzt. Die Modenverteilung beeinflußt sowohl die zeitliche als auch die räumliche Kohärenz des eingekoppelten Laserstrahls.

Bild 12: Transversale Modenverteilung (Speckle Pattern) am Ausgang einer Gradientenfaser

Die zeitliche Kohärenz des am Glasfaserende austretenden Lichts hängt von der Kohärenzlänge des eingekoppelten Laserstrahls (etwa 50 mm) ab, welche um die Faserdispersion reduziert wird. Die Faserdispersion setzt sich aus der Modendispersion, der Materialdispersion und der Profildispersion zusammen, bestimmend bleibt bei Multimodefasern jedoch meist die Größe der Modendispersion. Infolge der laufzeitoptimierten Brechungsindexprofile erreichen Gradientenindexfasern mit 0,5 ns pro Kilometer Faserlänge /39/ etwa 100 mal geringere Werte als vergleichbare Stufenindexfasern. Bei einer Faserlänge von 10 m ergibt sich somit ein Kohärenzlängenverlust von 1,5 mm oder 3%.

Analog zu dem ursprünglichen Laserstrahl beschränkt sich die strenge Einhaltung der räumlichen Kohärenz der transversalen Modenverteilung am Faserausgang auf Orte innerhalb des Beugungswinkels eines Modes, darüber hinaus verschwindet die räumliche Kohärenz kontinuierlich mit zunehmendem Beobachtungswinkel. Die

Anzahl der ausbreitungsfähigen Moden in einer Faser wird durch den normierten Frequenzparameter v beschrieben. Liegt v unter dem Wert 2.405, so spricht man von einer Monomodefaser.

$$v = R \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot NA \tag{14}$$

Hierbei bezeichnet R den Faserkernradius und NA die Numerische Apertur der Faser. Beim Parabelprofil liegt die Anzahl der Moden in der Größenordnung von $v^2/4$, wobei für jeden Mode die zwei senkrecht zueinander stehenden Versionen bereits berücksichtigt sind. Die Anzahl der Moden ist somit proportional zu der Fläche unter der Akzeptanzkurve der Gradientenfaser im Phasenraumdiagramm, vgl. Bild 9. Aus dem Kohärenzverlust außerhalb des Modenbeugungswinkels und der großen Anzahl möglicher angeregter und geführter Moden resultiert die Notwendigkeit einer gezielten, selektiven Anregung des Grundmodes, was durch die im nächsten Abschnitt gezeigte Einkopplung theoretisch und unter idealen Laborbedingungen auch praktisch zu bewerkstelligen ist. Der Grundmode kann aufgrund seiner zeitlichen und räumlichen Kohärenz zum Aufspannen eines Laser-Doppler-Meßvolumens herangezogen werden.

2.2.4 Bevorzugte Anregung des Fasergrundmodes durch einen Gaußstrahl

Wie den Darstellungen des letzten Abschnitts entnommen werden kann, breiten sich in Gradientenindexfasern verschiedene transversale Moden aus. Die verschiedenen $LP_{\nu\mu}$-Moden breiten sich in der Faser durch Reflexion zwischen den jeweiligen Kaustikflächen der Gradientenfaser aus, indem sie sich schraubenförmig mit wechselndem Abstand um die Faser winden. Diese Kaustiken sind zylindrische Flächen mit den Radien r_{Ki} und r_{Ka} /44/, vgl. auch Bild 11.

$$r^2_{k_{a,i}} = R^2 \left[\frac{f_w}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{f_w}{2}\right)^2 - \left(\frac{v}{v}\right)^2} \right] \tag{15}$$

Von den ausbreitungsfähigen Moden sollte möglichst nur ein leistungsstarker Mode, der Fasergrundmode angeregt und zum Betreiben eines Laser-Doppler-Anemometers herangezogen werden. Trifft ein Gaußstrahl genau die Faserachse und ist sein Strahltaillenradius w_o gleich dem Feldradius r_K des Grundmodes der Gradientenfaser, so wird theoretisch nur dieser Grundmode angeregt.

Mit der Näherung für die normierte Ausbreitungskonstante der Moden

$$f_w \approx \frac{2}{v}(2\mu - 1 + v) \tag{16}$$

berechnet sich für den Grundmode LP_{01} der Faser

$$f_w \approx \frac{2}{v} \tag{17}$$

und als Kaustikradius r_K für den LP_{01}-Mode der Faser, wobei r_{Ki} zu Null entartet und $r_{Ka} = r_K$ sich mit Gleichung (15) und Gleichung (17) ergibt zu

$$r_k = \sqrt{\frac{R \cdot \lambda}{\pi \cdot NA}} \tag{18}$$

Für das Beispiel einer Gradientenfaser mit NA = 0,2, R = 25 µm, λ = 0,5145 µm bestimmt sich der Feldradius des Fasergrundmodes zu r_K = 4,5 µm. Eine geeignete Einkopplung regt genau diesen Grundmodus an.

Gegeben sind Laserdaten, der Strahltaillenradius w_o, der Divergenzwinkel im Fernfeld Θ und die Laserwellenlänge λ. Gegeben ist ferner der Feldradius r_K für den Grundmode der Gradientenfaser. Gesucht ist jene Gauß'optische Linsenabbildung, die einen Strahltaillenradius w_1 auf der Faserstirnseite erzeugt, der mit dem Feldradius der Faser übereinstimmt, vgl. Bild 13.

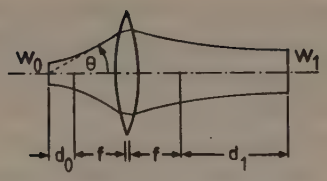


Bild 13: Transformation eines Gaußstrahls durch eine sphärische Linse /44/

Durch Abmessen der gewünschten Entfernung der Laserstrahltaille zur Einkoppellinse $d_{o,th}$ läßt sich mittels Anwendung der Transformationsgleichungen für den Gaußstrahl eine theoretische Linsenbrennweite f_{th} berechnen /45/:

$$f_{th} = \frac{w_1}{w_0}\sqrt{d_{o,th}^2 + \left(\frac{w_0}{\theta}\right)^2} \tag{19}$$

Die nach Gleichung (19) berechnete Brennweite liefert i.a. einen Wert, der von den katalogmäßig erhältlichen Standardbrennweiten abweicht. Da eine kommerziell erhältliche Linse ausgewählt werden muß, ändert sich der anfänglich angenommene Abstand $d_{o,th}$ zu

$$d_0 = w_0\sqrt{\left(\frac{f}{w_1}\right)^2 - \frac{1}{\theta^2}} \tag{20}$$

Damit berechnet sich d_1 zu

$$d_1 = \left(\frac{w_1}{w_0}\right)^2 \cdot d_0 \tag{21}$$

Mit d_o und f liegt die modenoptimierte Einkopplung fest. In der Praxis wird gegenüber den höherwertigen Fasermoden eine selektive Anregung des Fasergrundmodes mit etwa 20 dB erreicht /46/.

3. MESSTECHNIK

3.1 Laser-Doppler-Optik (Systemteil I)

Wie den Darstellungen des Abschnitts 2.1 entnommen werden kann, besitzen konventionelle Laser-Doppler-Anemometer eine charakteristische Baulänge von etwa 2 m, was infolge des oft nur begrenzt zur Verfügung stehenden Platzes in Motorenprüfstandkabinen zu Schwierigkeiten in der Anordnung des Anemometers sowie der dazugehörigen Traversierung führen kann. Dies ist der Grund für die Entwicklung kleiner Laser-Doppler-Sondenköpfe, die über Glasfasern mit einer konventionellen Optik kommunizieren. Das den entwickelten Sondenköpfen zugrundeliegende Funktionsprinzip der Sendestrahlaufteilung und Frequenzverschiebung vor der Einkopplung des Laserlichtes in die Glasfasern sowie die Vorarbeiten, die zu dieser Entwicklung führten, sind in /47/ und /48/ beschrieben. Der justierbare Sondenaufbau wurde bereits in /35/ vorgestellt, während die zuletzt verwendete Einkopplung innerhalb dieser Arbeit entwickelt und gebaut wurde. Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellte zweikanalige Laser-Doppler-System setzt sich, wie in Bild 14 schematisch dargestellt ist, aus drei Teilsystemen zusammen.

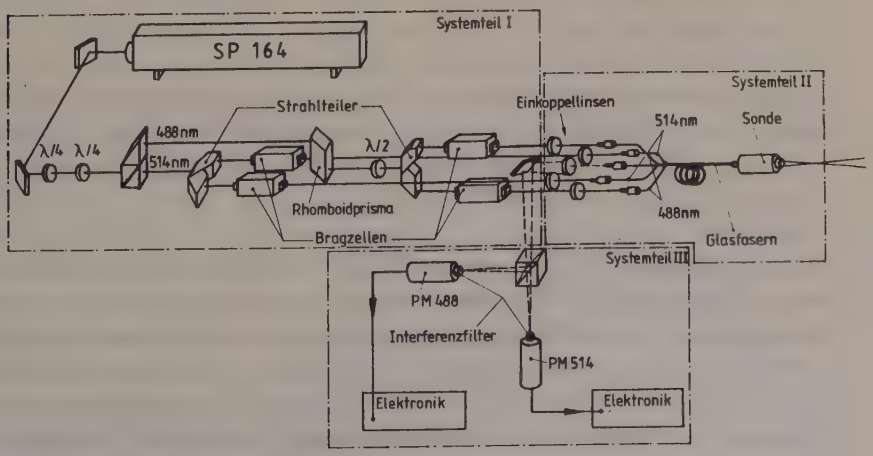


Bild 14: Prinzipieller optischer Aufbau des zweikanaligen Laser-Doppler-Sondenanemometers

Die in Bild 14 mit Systemteil I bezeichnete optische Grundeinheit besteht aus dem Laser und einer konventionellen OEI-Sendeoptik vom Typ LD-OK-A212. Der Laser, ein 5 W Argon-Ionen-Laser vom Typ 165 der Firma Spectra Physics emittiert mit der grünen (λ = 514,5 nm) und der blauen Farbe (λ = 488 nm) zwei Linien mit ausreichender Leistung, wie sie zum Betreiben eines zweikanaligen LDA-Systems erforderlich sind, vgl. Tabelle 1.

Bezeichnung	Abkürzung	λ = 514,5 nm	λ = 488 nm
Strahlradius in der Strahltaille $1/e^2$	w_o [µm]	532.6	518.7
Divergenzwinkel im Fernfeld $1/e^2$	$\Theta = \frac{\lambda}{\pi w_o}$ [mrad]	0,3075	0,2995
max. Strahlleistung	P [W]	2,0	1,5

Tabelle 1: Strahlcharakteristik in der Ebene des hinteren Planspiegels des Spectra Physics Lasers Typ 165 in Abhängigkeit von der grünen und blauen Wellenlänge /49/

Die in Tabelle 1 genannten Strahlleistungen der beiden Hauptlinien grün und blau sind in dieser Höhe notwendig, um im Rückstreuverfahren ausreichende Signalstärken zu erhalten. Durch die unterschiedlichen Wellenlängen resultieren ferner unterschiedliche Signalmerkmale wie sie zur Trennung der beiden Meßkanäle benötigt werden. Die beiden Meßkanäle dienen zur Messung der beiden normal zueinander stehenden Geschwindigkeitskomponenten.

Der aus dem Laser austretende mehrfarbige linearpolarisierte Strahl wird nach zweifacher 90°-Umlenkung mit Hilfe eines unter 45° zur Polarisationsrichtung des elektrischen Feldes gedrehten Viertelwellenlängenplättchens zirkular polarisiert. Ein fest mit dem drehbaren Hauptteil der Optik gekoppeltes, weiteres Viertelwellenlängenplättchen bewirkt nach azimutaler Justierung einen linearpolarisierten Laserstrahl mit einer Polarisationsrichtung, die den Erfordernissen des ersten Strahlteilermoduls angepaßt ist. Der folgende Farbteiler teilt den Laserstrahl in seinen grünen und blauen Anteil auf, derart, daß der grüne Strahl entlang der optischen Achse weiterläuft, während der blaue Strahl parallel zur optischen Achse an den folgenden optischen Komponenten für den grünen Strahl vorbeigespiegelt wird. Der zentrale grüne Strahl wird in einem Einkanalmodul über ein spezielles justage- und vibrationsunempfindliches Laser-Doppler-Strahlteilerprisma in zwei Teilstrahlen gleicher Intensität aufgeteilt. Diesen beiden Teilstrahlen werden mittels zweier Braggzellen unterschiedliche Frequenzverschiebungen aufgeprägt, um die beiden möglichen Teilchenflugrichtungen bei der Geschwindigkeitsmessung einer Komponente unterscheiden zu können. Nach den Braggzellen des grünen Strahlpaares wird der parallel zur optischen Achse verlaufende blaue Strahl über ein Rhomboidprisma auf die optische Achse zurückgespiegelt. Bevor der blaue Strahl in einem um 90° gegenüber dem ersten Strahlteilerprisma gedrehten zweiten Prisma ähnlich dem grünen Strahl in zwei Teilstrahlen gleicher Intensität aufgespaltet werden kann, muß auch die Polarisationsrichtung des blauen Strahls, die mit der Polarisation der grünen Strahlen noch übereinstimmt, um 90° gedreht und somit dem folgenden Strahlteilerprisma angepaßt werden. Die beiden aus dem Prisma austretenden blauen Teilstrahlen erhalten in zwei weiteren Braggzellen ebenfalls unterschiedliche Frequenzverschiebungen, um eine Richtungsunbestimmtheit bei der blauen Geschwindigkeitskomponente zu vermeiden.

Systemteil I generiert also aus einem mehrfarbigen Laserstrahl zwei normal zueinanderstehende Strahlenpaare, die sich in der

Farbe unterscheiden. Die zum Systemteil II gehörende Einkopplung der vier Laserstrahlen in vier Glasfasern wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

3.2 Glasfaser-Einkopplung und Sonde (Systemteil II)

3.2.1 Einkopplung

Die den konventionell aufgebauten Systemteil I verlassenden parallelen Laserstrahlen werden einer in Bild 14 mit Systemteil II bezeichneten Einkopplung zugeführt, welche die Strahlen in Glasfasern einkoppelt. Die Glasfasern führen zu der Sonde, die gleichfalls in Bild 14 angedeutet ist. Die Glasfasereinkopplung besteht aus vier in der Ebene normal zur optischen Achse unabhängig verschiebbaren Einkoppellinsen, welche die vier einfallenden Laserstrahlen auf die Faserstirnseiten fokussieren. Durch Justieren der Einkoppellinsen treffen die Laserstrahlen genau die Faserachse. Unter Anwendung von Gleichung (18) läßt sich für die vorgesehenen Gradientenindexfasern der leicht wellenlängenabhängige, gewünschte Feldradius r_K bestimmen, der zu eine bevorzugten Anregung des Fasergrundmodes führt. Erstes Ziel der Einkopplungsberechnung ist es, die in Tab. 1 angegebenen, wellenlängenabhängigen Strahlradien w_o, wie sie in der Ebene des hinteren Laserspiegels (Planspiegel) vorliegen, mittels einer Fokussierungslinse der Brennweite f gemäß Bild 13 und unter Anwendung der Gleichungen (19) und (20) auf die gewünschten, farbabhängigen Feldradien r_K zu transformieren. Für die grüne und die blaue Wellenlänge soll jeweils

$$w_1 \overset{!}{=} r_k \tag{22}$$

gelten. Da Gleichung (19) infolge der beiden unbekannten Parameter d_o und f unterbestimmt ist, muß ein Parameter, am besten die diskrete Linsenbrennweite, in einem Iterationsschritt durch

Abmessen des gewünschten Abstandes $d_{o,th}$ bestimmt werden. Daraus resultiert eine theoretische Brennweite f_{th}, die mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht zu den katalogmäßig erhältlichen Standardbrennweiten gehört. Durch Wahl der nächstgrößeren Katalogbrennweite f vergrößert sich der ursprüngliche Abstand $d_{o,th}$ zu d_o gemäß Gleichung (20). Damit liegt die Einkopplung der Laserstrahlen in die Glasfaser fest, soweit es die geometrischen und optischen Hauptabmessungen betrifft. Die konstruktive Ausführung der Einkopplung wird nachfolgend erläutert, man vergleiche hierzu auch Anhang A. Um bei dem diagonalen Strahlabstand von 50 mm der vier einzukoppelnden Laserstrahlen vier hochpräzise xy-Traversierungen für die Justierung der Einkoppellinsen unterzubringen, wird innerhalb des Einkoppelmoduls der diagonale Strahlabstand mit Hilfe von vier sternförmig angeordneten, jeweils 10 mm langen Rhomboidprismen von 50 mm auf 70 mm erhöht. Die Einkoppellinsen werden auf vier kleinen, normal zur optischen Achse verstellbaren Kreuztischen geführt, vgl. Anhang A, die aufgrund von Differentialschrauben-Antriebsspindeln der Firma Spindler & Hoyer (Typ BD.30.01) eine Auflösung von 0,1 µm aufweisen. Die Glasfaserenden sind in vier Längstraversierungen geführt, die eine Justierung der Tiefenschärfe der fokussierten Laserstrahlen auf der Faserstirnfläche gestatten. Eine Einrichtung zur Faserkippung ist aus Platzgründen in dieser Einkopplung nicht vorgesehen, sie ist bei einer exakten Justierung der vier einfallenden Laserstrahlen normal zur Stirnseite des Einkoppelmoduls auch nicht nötig. Diese Art der Strahljustierung erfolgt in der Regel beim Systemaufbau mit Hilfe der zu Systemteil I gehörenden beiden Umlenkspiegel nach dem Laser. Eine Fotografie der Einkopplung, auf der die Differentialschrauben erkennbar sind, zeigt Bild 15.

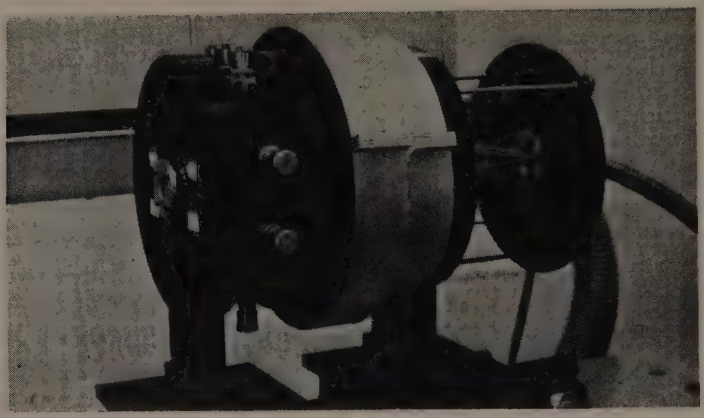


Bild 15: Einkoppelmodul zur Einkopplung von vier Laserstrahlen in vier Glasfasern

3.2.2 Sonde

Mit Hilfe der im letzten Abschnitt beschriebenen Einkopplung gelingt es, vier parallele Laserstrahlen in vier verschiedene Glasfasern einzukoppeln. Im Kern dieser Faser wird das Licht zu den 10 m entfernten Faserenden geführt. Nach Austritt des Lichtes aus den Faserendsteckern entfallen die lichtführenden Eigenschaften, wie sie innerhalb der Fasern vorlagen. Deshalb wird das Licht aufgrund von Beugung an seinem kleinen Feldradius am Ende des Faserkerns stark divergent. Nach Projezierung auf eine Wand und ohne weitere abbildende Elemente zeigt sich deshalb ein typisches Speckle-Muster gemäß Bild 16.

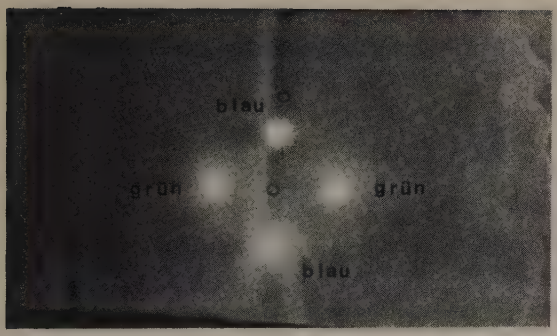


Bild 16: Aufnahme der vier Sendestrahlen nach Austritt aus der Zweikanalsonde bei Projektion auf eine Wand

Die vier Sendefasern führen zu einer Zweikanalsonde, deren prinzipieller Aufbau in Bild 17 dargestellt ist.

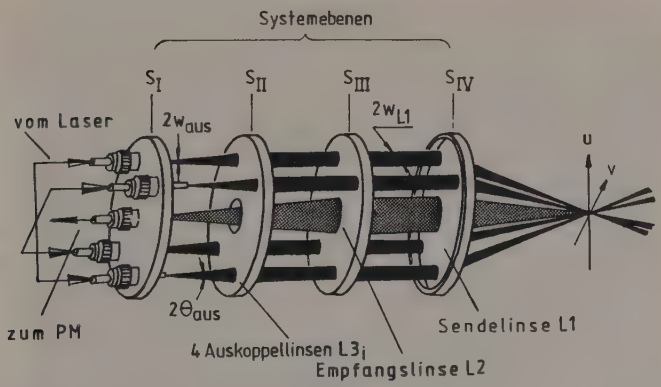


Bild 17: Prinzipskizze der Zweikanalsonde mit Angabe der vier Systemebenen

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Glasfasersonden umfassen mehrere Systemebenen, deren Funktion nachfolgend kurz beschrieben werden soll.

Die erste Systemebene S_I dient zur Aufnahme der vier Sendefaser-Steckerenden sowie des Empfangsfaser-Steckeranfangs. Das aus den Sendefasern von dem Systemteil I der OEI Sendeoptik kommende Licht, das nach dem Faseraustritt stark divergiert, wird in der zweiten Systemebene S_{II} mit Hilfe der Auskoppellinsen $L3_i$ kollimiert, um einen parallelen Strahlengang zu erzeugen.

Die vier parallelen Sendestrahlen passieren die Systemebene S_{III} ohne Manipulation. Die Sendelinse L1 der Systemebene S_{IV} fokussiert die vier Strahlen in das gemeinsame Schnittvolumen, das Meßvolumen der LDA-Sonde. In diesem Volumen kann man sich zwei orthogonale, farbunterschiedliche Streifensysteme vorstellen, welche Teilchen beleuchten, die durch die Strömung in das Meßvolumen transportiert werden. Das Streulicht von diesen Teilchen wird von der Linse L1 der Systemebene S_{IV} in Rückwärtsrichtung empfangen und in kollimierter Form zur Systemebene S_{III} weitergeleitet. Dort sitzt die Empfangslinse L2, welche das Streulicht zwecks Einkopplung auf die Stirnseite der fünften Faser, der zentralen Empfangsfaser bündelt. Diese Empfangsfaser führt zu dem Photodetektorsystem, das im Systemteil III untenstehend beschrieben wird.

Die nächsten vier Unterkapitel beschäftigen sich mit der Sondenauslegung, dem Einstellvorgang sowie den beiden Sondenrealisierungen für Messungen in Otto- und Dieselmotoren.

3.2.2.1 Eigenschaften von Lichtwellenleitern und Sondenauslegung

Glasfaser-Lichtwellenleiter dienen der geführten Lichtübertragung über lange Entfernungen, wo der Einsatz konventioneller optischer Elemente wie Linsen, Spiegel und Blenden räumlich kom-

plizierte Anordnungen und hohe Lichtverluste mit sich bringt. Zufolge Abschnitt 2.2.1 existieren drei prinzipiell unterschiedliche Glasfasertypen, von denen sich nur zwei für einen Einsatz im Transmissionsteil eines Laser-Doppler-Anemometers eignen, die Monomode und die Gradientenindexfasern. In dieser Arbeit ist der Gradientenindexfasereinsatz beschrieben. Aufgrund der vergleichsweise kurzen benötigten Faserlängen bei Glasfaser-Laser-Doppler-Anemometern überwiegen die Ein- und Auskoppelverluste die Lichttransmissionsverluste innerhalb der Fasern bei weitem. Über die oben beschriebene Einkopplung gelingt es, mit konventionellen Laser-Doppler-Transmissionsoptiken selektiv Moden niedriger Ordnung in Gradientenindex-Lichtwellenleitern anzuregen und somit eine flexible Kopplung zwischen konventioneller Optik und beweglichem Laser-Doppler-Sondenkopf zu ermöglichen. Die in dieser Arbeit favorisierten Sonden, die pro Meßkanal zwei sendeseitige Gradientenindex-Glasfasern benötigen, führen zu partiell verzerrten Streifensystemen, vgl. Bild 18, welche eine besonders sorgfältige Sondenauslegung erfordern.

Bild 18: Streifensystem bei Überlagerung unterschiedlicher Speckle-Pattern

Die Gründe, dennoch Fasern dieses Typs für die Sonde zu wählen, wurden in Abschnitt 2.2.1 angegeben. Sie waren wie folgt angegeben worden:

- o Ausreichende Leistungsübertragung für Rückstreumessung;
- o Ausreichende Kohärenzerhaltung.

Nachdem aufgrund der übertragbaren Laserleistung und ausreichender Kohärenzerhaltung das Funktionieren einer Rückstreusonde im Grundkonzept gesichert erscheint, geht es im folgenden um die Erklärung und Berechnung der Systemebenen S_{II}, S_{III} und S_{IV} der Sonde, also um die Kollimierung und Fokussierung der aus der Faser austretenden Sendestrahlen, sendeseitige Auskopplung genannt, um die Wahl der Frontlinse, sowie um die Kollimierung und Fokussierung des Streulichtes auf die Empfangsfaser, die empfangsseitige Einkopplung, vgl. Bild 17.

Vor der Auslegung müssen die maßgeblichen Sondenparameter festliegen, z.B. die angestrebte Meßvolumengröße und die gewünschte Frontlinsenbrennweite; dann kann die Sonde systematisch ausgelegt und konstruiert werden.
Die vier Sendefasern emittieren im Idealfall der selektiven Grundmodeanregung gemäß Abschnitt 2.2.4 in der Systemebene I (Bild 17) vier Laserstrahlen mit einem Feldradius von 4,5 µm und einer Strahldivergenz von 36 mrad.

Durch den Transmissionsteil der Glasfasersonde läßt sich der am Faseraustritt vorliegende Feldradius auf den gewünschten Meßvolumenradius vergrößern. Die Erfahrungen des Autors beim Bau verschiedener, nach dem Rückstreuprinzip arbeitender Glasfaser-Laser-Doppler-Anemometer haben gezeigt, daß bei einem Meßvolumendurchmesser von etwa 50 µm sehr gute Signal-Rausch-Verhältnisse erwartet werden dürfen. Die Meßvolumengröße ergibt sich aus der Vergrößerung der am Faserende austretenden Lichtverteilung.

Gemäß Abschnitt 2.2.4 beträgt der Feldradius r_K des Fasergrundmodes der eingesetzten Gradientenfaser für die grüne Laserwellenlänge 4,5 µm. Durch den Transmissionsteil der Glasfasersonde läßt sich über die Wahl des sendeseitigen Vergrößerungsverhältnisses M_S

$$M_S = \frac{f_{L1}}{f_{L3i}} \tag{23}$$

der Feldradius r_K, wie er am Faseraustritt vorliegt, auf den gewünschten Meßvolumenradius vergrößern.

Durch eine Vergrößerung des 9 µm großen Felddurchmessers des Fasergrundmodes um Faktor sechs wird ein Meßvolumendurchmesser von 54 µm erreicht. Der Vergrößerungsfaktor sechs läßt sich mit den kommerziell erhältlichen Linsen gut erreichen. Legt man bei der Systemebene IV die Sendelinsenbrennweite f_{L1} auf 300 mm (60 mm)* fest, so sind in der Systemebene II der Sonde, vgl. Bild 17, Auskoppellinsenbrennweiten f_{L3i} von 50 mm (10 mm)* erforderlich. Die dazugehörigen Aperturen $\varnothing_{L3i}$ der Auskoppellinsen $L3_i$ berechneten sich aus der maximalen Strahldivergenz und der Linsenbrennweite gemäß Gleichung (24):

$$\Phi_{L3i} = 2\Theta_{aus} \cdot f_{L3i} \cdot m \tag{24}$$

Infolge der Modenbewegung ist in Gleichung (24) eine um den Faktor m größere Linsenapertur berücksichtigt. Die vergrößerte Apertur verhindert, daß unter ungünstigen Bedingungen der aus einer Sendefaser austretende Laserstrahl von der Fassung der betreffenden Auskoppellinse teilweise ausgeblendet wird. Liegt der Faktor m bei etwa 2 bis 3, so tritt dieser Ausblendeffekt nicht auf.

---

* Klammerwerte beziehen sich auf die Ottosonde, die Werte vor der Klammer auf den Prototyp der Dieselsonde

Mit der bisher beschriebenen Auslegung der Transmissionsoptik der Sonde werden die optischen Abmessungen der vier parallelen Sendestrahlen festgelegt. Die vier Sendestrahlen wurden von der Frontlinse L1 der Systemebene S_{IV} in das Meßvolumen fokussiert. Fliegen Teilchen durch das Meßvolumen, so streuen diese Laserlicht mit der für ihre Geschwindigkeit charakteristischen Frequenz. Dieses Streulicht wird in Rückwärtsrichtung, also entgegen der gemeinsamen Lichtausbreitungsrichtung der Sendestrahlen, von der Frontlinse L1 empfangen und kollimiert. Müßten die bereits oben angesprochenen Modenbewegungen, die zu Meßvolumenbewegungen führen, nicht mitberücksichtigt werden, so würde eine 1:1 Streulichtabbildung auf die 50 µm große Empfangsfaserstirnseite genügen, wobei eine Empfangslinse L2 mit einer Brennweite von 300 mm zum Einsatz käme. Dann könnte unter ungünstigen Bedingungen jedoch kein Teilchenstreulicht eingekoppelt werden. Also erfordert die Auslegung der empfangsseitigen Streulichteinkopplung (Systemebene S_{III} der Sonde in Bild 17) ebenfalls die Berücksichtigung der Modenbewegungen. Durch eine geeignete Wahl des empfangsseitigen Abbildungsverhältnisses M_E

$$M_E = \frac{f_{L2}}{f_{L1}} = \frac{2R}{\phi_{MV} \cdot m} \qquad (25)$$

läßt sich der Meßvolumendurchmesser $\emptyset_{MV}$ auf den m-ten Teil des Faserkerndurchmessers 2R verkleinern. Geeignet ist eine optische Verkleinerung m um etwa Faktor zwei bis drei. Bei einer Sendelinse von 300 mm (60 mm)* resultiert damit eine empfangsseitige Einkoppellinse von 100 mm (20 mm)* Brennweite. Durch diese Auslegungsmaßnahmen kann auch beim Bewegen der Faser noch Streulicht aus dem Meßvolumen empfangen werden.

---

* Klammerwerte beziehen sich wiederum auf die Ottosonde, die Werte vor der Klammer auf den Prototyp der Dieselsonde

3.2.2.2 Sondeneinstellung

Um gute Signal-Rauschverhältnisse zu gewährleisten, bedarf die Fasersonde neben einer guten optischen Auslegung auch einer präzisen Einstellung der axialen Faserpositionen (Systemebene S_I), sowie der radialen Auskoppellinsenpositionen (Systemebene S_{II}). Neben dieser exakten Einstellung muß auch eine sichere Fixierung dieser Einstellung vorgenommen werden.

Ziel des Einstellvorganges ist es, die vier Sendestrahlen gemeinsam mit dem zentralen "Empfangsstrahl" ideal ins Meßvolumen zu fokussieren. Ideal bedeutet Deckungsgleichheit der fünf Strahltaillen. Diese Deckungsgleichheit kann mit einer kurzbrennweitigen Beobachtungslinse durch Abbilden des Meßvolumens an eine Wand beobachtet werden.

Während es möglich ist, den Justagevorgang der vier Sendestrahlen visuell gut zu verfolgen, gelingt dies bei der Einstellung der fünften Faser nicht, da kein sichtbarer Laserstrahl vorliegt. Somit ist es erforderlich, daß die für das Streulicht vorgesehene fünfte Faser, für die Justage mittels eines in die Empfangsfaser eingekoppelten Strahls eines Helium-Neon-Hilfslasers, der die Faser entgegen der im Meßbetrieb vorgesehenen Richtung durchläuft, beaufschlagt wird. Da die empfangsseitige Einkoppellinse L2 unverschieblich im Sondenkörper montiert ist, stellt die Achse des austretenden Hilfsstrahles automatisch die optische Achse der Sonde dar.

Im ersten Justageschritt wird die Strahltaille des Hilfsstrahles durch axiales Verschieben der Empfangsfaser in der Systemebene S_I des Sondenkörpers genau in die Nennschnittweite der Sendelinse verschoben. Bei diesem Vorgang bleiben die vier Sendestrahlen ausgeblendet. Die justierte Strahltaille des Hilfsstrahles wird im weiteren Justageverlauf mittels einer kurzbrennweitigen Linse an eine Wand projeziert. Nach Entfernen der Strahlabdeckung des ersten Sendestrahls erfolgt die axiale Justage des betreffenden

Fasersteckers in der Systemebene I, solange, bis die an die Wand projezierte Taille des eingestellten Strahls an der selben Stelle wie die des Hilfsstrahls liegt, d.h. der an der Wand abgebildete Sendestrahldurchmesser minimiert ist. Danach wird durch radiale Verschiebung der betreffenden Auskoppellinse in der Systemebene S_{II} der Sendestrahl mit dem Hilfsstrahl überlagert. Nach abgeschlossener Einstellung und Fixierung der Positionen von Faser und Auskoppellinse wird der justierte Sendestrahl abgedeckt und der nächste Sendestrahl zwecks Einstellung freigegeben. Dieser und auch die restlichen beiden Strahlen erfahren die gleiche Einstellprozedur wie der erste Strahl. Am Ende des Einstellvorganges sollen sich alle fünf Strahlen in ihrer Strahltaille in idealer Weise schneiden.

3.2.2.3 Praktische Sondenrealisierungen

Der Autor dieser Arbeit hat während seiner Tätigkeit am LSTM-Erlangen verschiedene Glasfaser-LDA-Sonden entwickelt, gebaut und eingesetzt. Gemäß den Auslegungsprinzipien des Abschnitts 3.2.2.1 wurden für die hier geschilderten Anwendungen in Verbrennungsmotoren verschiedene Sonden gebaut und für Messungen in einem angetriebenen Diesel- und einem gefeuerten Ottomotor eingesetzt. Die erste Sonde wies bei Gehäuseabmessungen von Ø 30 mm x 200 mm einen Strahlabstand von 14 mm auf und eignete sich bei Einsatz einer Sendelinse mit 60 mm Brennweite für Messungen in einem für Meßzwecke modifizierten Einzylinder-Ottomotor.

Bild 19 zeigt die Sonde bei einem Vorversuch am Motorenstand, um die Funktionstüchtigkeit der Auswerteelektronik und die Strahlqualität der Optik an einem Freistrahlexperiment vor der Motorenmessung nochmals zu kontrollieren.

Die Zusammenbauzeichnung der Ottomotorsonde ist in Anhang B angegeben. Eine Zusammenfassung der optischen Kenngrößen liefert Tabelle 2.

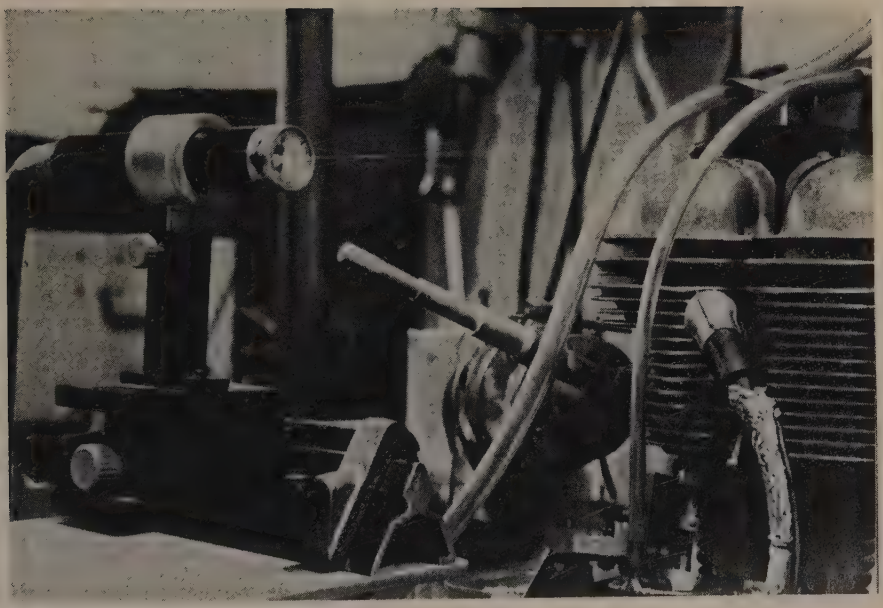


Bild 19: Zweikanalsonde mit 60 mm Brennweite

			Otto-sonde	Diesel-sonde (Prototyp)	Sonde 1000 (Prototyp)	SULZER-Sonde
Strahlabstand	d	[mm]	14	35	35	75
Strahldurchmesser am Faseraustritt (LP_{01})	$2\,W_{aus}$	[µm]	4.52	4.52	4.52	4.52
Strahldurchmesser (LP_{01}) vor Frontlinse*	$2\,W_{aus}$	[mm]	0.72	3.6	3.6	7.2
Strahldivergenz am Faseraustritt (Halbwinkel)*	θ_{aus}	[mrad]	36.23	36.23	36.23	36.23
Brennweite Sendelinse L1	f_{L1}	[mm]	60	300	1000	600
Brennweite Empfangslinse L2	f_{L2}	[mm]	16	80	80	300
Brennweite Auskoppellinse $L3_i$	f_{L3i}	[mm]	10	50	50	100
halber Schnittwinkel	φ	[°]	6.65	3.34	1.00	3.58
sendeseitiger Meßvolumendurchmesser*	$Ø_{MV,S}$	[µm]	54	54	180	54
sendeseitige Meßvolumenlänge*	$L_{MV,S}$	[mm]	0.47	0.93	10.32	0.86
Faktor m	m	-	3.75	3.75	3.75	2
empfangsseitiger Meßvolumendurchmesser*	$Ø_{MV,E}$	[µm]	202.5	202.5	675	108
empfangsseitige Meßvolumenlänge*	$L_{MV,E}$	[mm]	1.73	3.45	38.66	1.73
Interferenzstreifenabstand grün	Δx_{514}	[µm]	2.22	4.41	14.73	4.12
Interferenzstreifenabstand blau	Δx_{488}	[µm]	2.11	4.18	13.98	3.91
Anzahl der Interferenzstreifen	N_{fr}	-	24	12	12	13

* Dieser Wert gilt für λ = 514.5 nm. Bei λ = 488 nm erniedrigt sich der betreffende Wert auf 94,85% des Tabellenwertes entsprechend dem Wellenlängenverhältnis 488 nm/514.5 nm.

Tabelle 2: Zusammenfassung der optischen Kenngrößen

Für die in dieser Arbeit gleichfalls angestrebten Messungen in großen Schiffsdieselmotoren bzw. -modellmotoren reichen die 60 mm Arbeitsdistanz der Ottomotor-Sonde bei weitem nicht aus. Da sich mit einer Vergrößerung der Sendelinsenbrennweite von f_{L1} auf $f_{L1'}$ das Signal-Rauschverhältnis SNR_{L1} um die dritte Potenz des Brennweitenverhältnisses zu $SNR_{L1'}$ verschlechtert, wurde eine komplette Sondenneukonstruktion angestrebt.

$$\frac{SNR_{L1'}}{SNR_{L1}} = \left(\frac{f_{L1}}{f_{L1'}}\right)^3 \qquad (26)$$

Nach dem Bau und Test eines Sondenprototyps mit zwei verschiedenen Sendelinsenvarianten, vgl. Tabelle 2, wurde die für die Messungen im großen Schiffsdieselmotor vorgesehene SULZER-Sonde eingebaut, die gegenüber dem Prototyp um den Faktor zwei größere Abmessungen aufweist.

Die Prototyp-Dieselsonde für Messungen des zu erwartenden Signal-Rauschverhältnisses weist bei Außenabmessungen von Ø 70 mm x 300 mm eine Brennweite der Sendelinse von 300 mm auf. Weitere optische Kenngrößen der Dieselsonde (Prototyp) im Vergleich zur Ottosonde und zur SULZER-Sonde können der Gegenüberstellung in Tabelle 2 entnommen werden. Die Zusammenbauzeichnung der Prototyp-Sonde wird in Anhang C angegeben.

Mit einer Sendelinsenbrennweite von 300 mm erreicht die Prototyp-Dieselsonde im mit kleinen Wassertröpfchen versetzten Laborfreistrahl beste Signal-Rauschverhältnisse. Dies bestätigen sowohl eine hardwaremäßige Messung des Signalfrequenzspektrums mit einem HP Spektrumanalysator vom Typ 1615A, als auch eine softwaremäßige Spektrumserzeugung aus dem digitalisierten Doppler-Signal. Die Messung mit dem Spektrumsanalysator beruhte auf einem Vergleich der spektralen Signalleistung zwischen dem Dopplersignal und dem überlagerten Rauschanteil. Ein solches Signalleistungsspektrum ist in Bild 20 gezeigt.

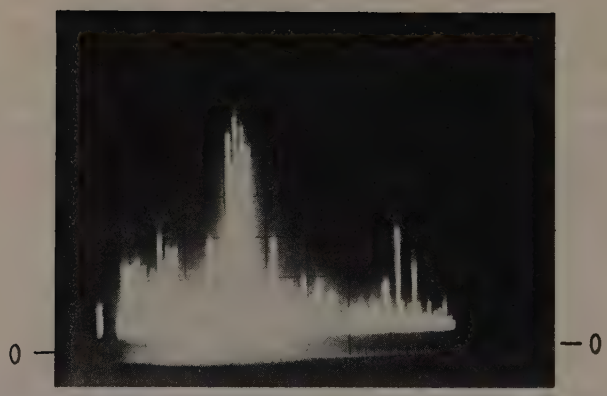


Bild 20: Signalleistungsspektrum der Dieselsonde (Prototyp) bei Anwendung auf einen Laborfreistrahl;
vertikal: 10 dB/division, horizontal: 0.5 MHz/division

Die ablesbaren Signal-Rauschverhältnisse liegen zwischen 10 dB und 30 dB, also zwischen 100 und 1000.

Die parallel dazu durchgeführten Transientenrekordermessungen führen in Verbindung mit einer softwaremäßigen Spektrumserzeugung zu einem über 100 Bursts gemittelten Signal-Rauschverhältnis von 600. Die softwaremäßige Berechnung des Signal-Rauschverhältnisses geschieht über den Quotienten der Flächenanteile des Amplitudenspektrums. Verglichen wird die Fläche unter dem Spektrumsmaximum mit der Fläche unter dem Rest des Spektrums.

Bild 21 zeigt ein gefiltertes Dieselsondensignal (Prototyp) aus der Messung in einem mit etwa 1 µm großen Wassertröpfchen versetzten Laborfreistrahl, vgl. hierzu auch Abschnitt 3.3.3. Die Sendelinsenbrennweite der Dieselsonde beträgt 300 mm gemäß Tabelle 2.

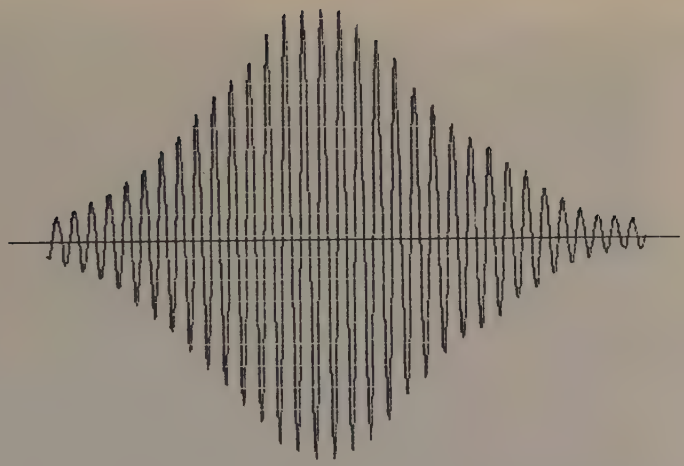


Bild 21: Gefiltertes Doppler-Signal der Dieselsonde (Prototyp); Frequenz 1.7 MHz, Laserleistung 640 mW, grün, Hochpaß 0.5 MHz, Tiefpaß 10 MHz

Neben diesen Messungen mit der 300 mm Sendelinse wird hier auch über eine Brennweitenvariation auf 1000 mm berichtet. Die optischen Kenngrößen dieser aufgrund der langen Brennweite mit "Sonde 1000" (Prototyp) bezeichneten Sondenvariante können Tabelle 2 entnommen werden. Konstruktiv stimmt diese Sonde mit der in Anhang C angegebenen Dieselsonde (Prototyp) überein.

Bild 22 zeigt diese langbrennweitige Dieselsondenvariante (Prototyp) bei Signal-Rausch-Messungen im Laborfreistrahl. Trotz des kleinen Schnittwinkels φ von nur 1° und der damit verbundenen großen Meßvolumenabmessungen sowie dem großen Interferenzstreifenabstand, erreicht die Sonde 1000 noch mittlere Signal-Rauschverhältnisse von 20, gemessen über einen softwaremäßigen Flächenvergleich im Frequenzspektrum der Signalamplituden.

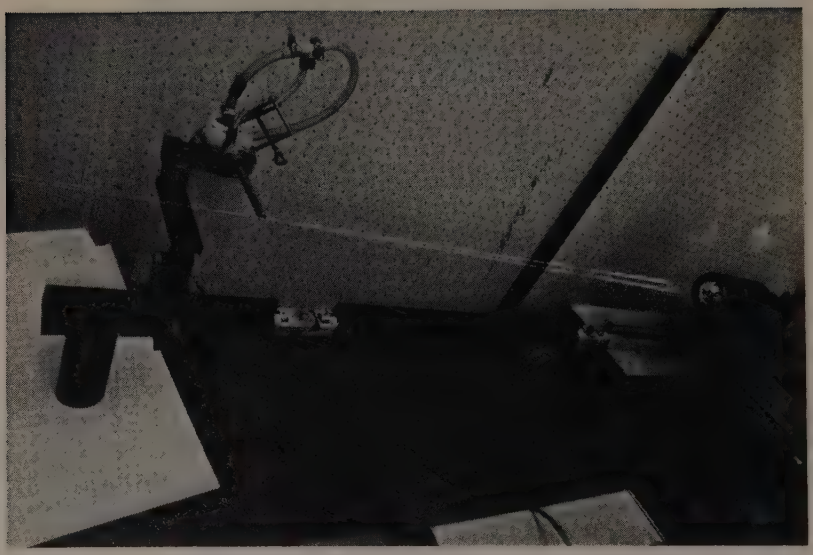


Bild 22: Sonde 1000 bei Signal-Rausch-Messungen im Laborfreistrahl

3.3 Empfangseinheit und Signalverarbeitung (Systemteil III)

3.3.1 Empfangseinheit

Wie im Abschnitt 3.2 angedeutet, führt die zentrale fünfte Glasfaser der Zweikanal-LDA-Sonde das gemeinsame Streulicht aus dem durch das grüne und das blaue Sendestrahlenpaar aufgepannten Meßvolumen zu dem Photodetektorsystem, siehe Bild 23.

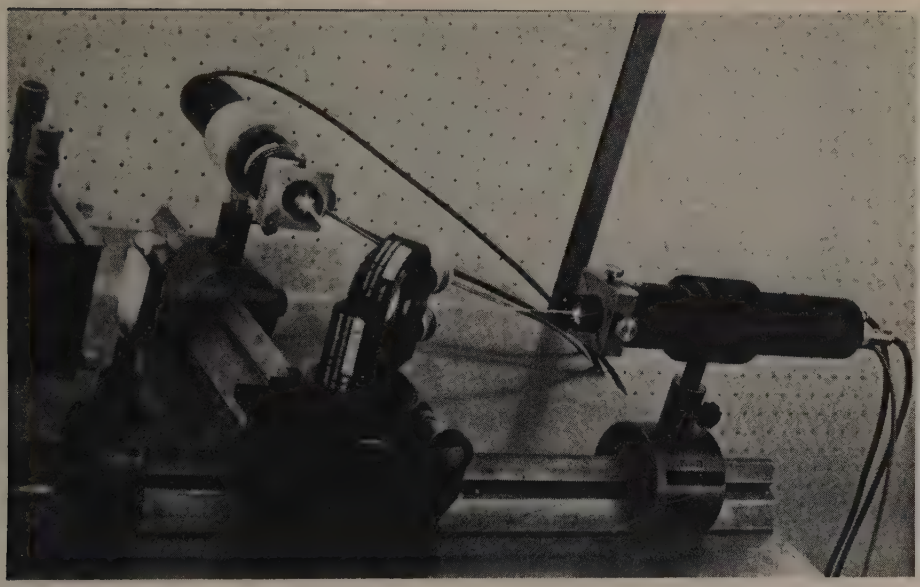


Bild 23: Empfangssystem des zweifarbigen Glasfaser-Laser-Doppler-Anemometers

Das Ende der Empfangsfaser ist in dem, am linken Bildrand des Bildes 23 gezeigten Mehrkomponententisch befestigt. Dieser Verstelltisch ermöglicht eine schnelle und genaue Einstellung der empfangsseitigen Abbildung. Aus der Empfangsfaser tritt das Streulicht mit einer Punktgröße von 2R = 50 µm und der auf den Halbwinkel bezogenen numerischen Apertur der Faser NA = 0.2, also in stark divergierender Form aus. Mittels einer nach dem Linsengesetz der geometrischen Optik

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \qquad (27)$$

ausgelegten Sammellinsenabbildung vergrößert sich die bildseitige Punktgröße um den Faktor fünf auf 250 µm. Die Vergrößerung bewirkt eine gegenüber der faserseitigen Gegenstandsweite a um den Faktor fünf größere pinhole-seitige Bildweite b. Durch diese große Bildweite entsteht Raum für den Einbau eines unter 45° zur optischen Achse geneigten Farbteilerspiegels, der das Streulicht in den grünen und blauen Streulichtanteil aufteilt. Der grüne Streulichtanteil passiert den Farbteilerspiegel entlang der optischen Achse, der blaue Streulichtanteil wird um 90° aus der optischen Achse herausgespiegelt. Beide farbunterschiedlichen Streulichtstrahlen treffen jeweils auf das Pinhole eines Photomultikators.

Da die Empfangsfaser bei der Einkopplung des Streulichtes in der Sonde bereits als Pinhole wirkt, dürfen die Pinholes der Photomultiplikatoren das aus der Empfangsfaser austretende Licht ohne weitere Ausblendung zu der Photokathode passieren lassen. Deshalb sind die Pinholes mit 250 µm genau so groß dimensioniert wie die Streulichtfoki. In jedem dieser Pinholes ist ein auf die Wellenlänge abgestimmter, etwa 10 nm breiter Interferenzfilter eingebaut, um eine ausreichende Trennschärfe zwischen grünem und blauem Streulichtanteil zu erreichen. Die Photomultiplikatoren wandeln die optischen Signale in elektrische Signale um, deren Frequenzen ein Maß für gemessene Geschwindigkeitskomponenten sind. Bild 23 zeigt diese Detektoreinheit sowie den Strahlengang des normalerweise unsichtbaren, weil sehr lichtschwachen Streulichtes.

Da für die Messungen in gefeuerten Ottomotoren nur eine einkanalige Signalauswertung zur Verfügung stand, lief der zweite Optikkanal (blaue Wellenlänge) bei den ottomotorischen Messungen ohne Auswertung leer mit. Bei den Messungen im geschleppten Modell-Dieselmotor der Firma Gebrüder SULZER GmbH konnte dagegen zweikanalig synchron empfangen und ausgewertet werden.

3.3.2 Signalverarbeitung

In stationären Strömungen, bei denen niedrige Datenraten durch entsprechend längere Meßzeiten kompensiert werden können, empfiehlt sich wegen der besseren Transparenz der Arbeitsweise und der flexiblen Anpassung an unterschiedliche Signalqualitäten oder an bestimmte Signaleigenschaften der Einsatz eines Transientenrekorder verbunden mit einem Kleinrechner, siehe /50/ und /51/. Instationäre Strömungen dagegen erfordern hohe Datenraten, die von einer Transientenrekorderelektronik nicht erreicht werden. Counterelektroniken sind erforderlich, um diese hohen Datenraten zu bewältigen. Auf das in der Literatur häufig diskutierte Biasing-Problem, das zu Fehlmessungen aufgrund einer erhöhten Wahrscheinlichkeit des Auftretens schneller Streuteilchen führen kann, sowie auf Wege zur nachträglichen softwaremäßigen Biasing-Unterdrückung /52/ bis /56/, wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Es sei an dieser Stelle nur angemerkt, daß es auch Counter-Elektroniken gibt /57/, welche dieses inhärente Problem konventioneller teilchenmittelnder Elektroniken aufgrund der zeitmittelnden Arbeitsweise des in /57/ vorgestellten Countersystems eliminieren.

Die maximal mögliche Arbeits- und Übertragungsgeschwindigkeit einer LDA-Auswerteelektronik ist für Messungen in Motoren also sehr wichtig, da sie die meßtechnisch erreichbare zeitliche Auflösung bestimmt, falls bei den Messungen genügend Teilchen in der Strömung zu verwertbaren Signalen führen. So erfordert die Erfassung von Einzelzyklen bei einer gewünschten Auflösung von einem Grad Kurbelwinkel (1° KW) und einer Drehzahl von 1500 1/min eine Datenrate von mindestens 9 kHz im Mittel. Datenraten in dieser Größenordnung können, sofern sie meßtechnisch erreicht werden, im hochturbulenten Strömungsfall nur mit Counter-Elektroniken verarbeitet werden, wie sie speziell für LDA-Messungen entwickelt wurden. Solche Elektroniken werden heute kommerziell angeboten.

3.3.2.1 Einkanalige Counterelektronik

Die in dieser Arbeit vorgestellten Messungen in einem gefeuerten Ottomotor wurden mit einer einkanaligen, auf einem TSI-Counter (Typ 1990B) basierenden Signalverarbeitungselektronik erhalten. Ein Blockschaltbild der Gesamtelektronik ist in Bild 24 gezeigt.

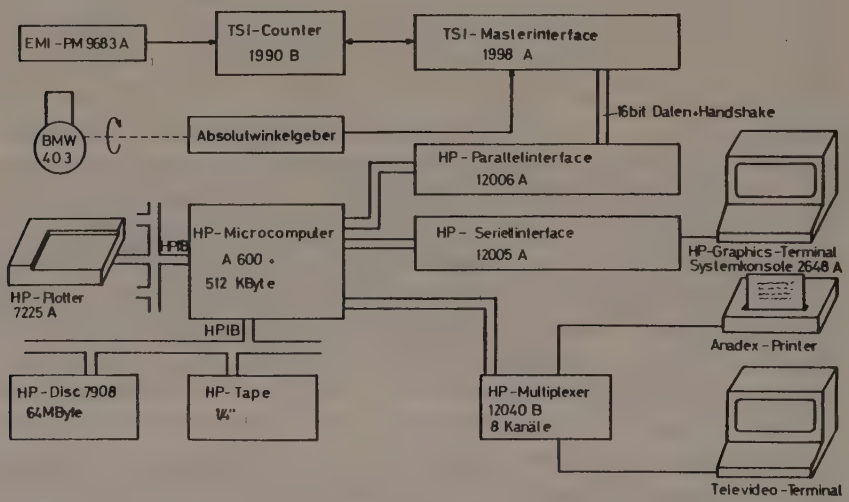


Bild 24: Blockschaltbild der einkanaligen Auswerteelektronik

Die von dem Photomultiplikator gelieferten Doppler-Signale werden gemäß Bild 24 einem TSI-LDA-Counter zugeführt. Ein LDA-Counter ist ein spezieller Zähler für die Frequenzmessung einzelner, kurzzeitiger und rauschbehafteter Signale mit einer typischen Burstform, wie sie nach Hochpaßfilterung von LDA-Signalen vorliegt. Diese Hochpaßfilterung erfolgt im ersten Teil des Input Conditioners (Modell 1994B), der Eingangsstufe des TSI-Counters. Nach einer zusätzlichen Begrenzung der oberen Signalfrequenzband-

breite mit Hilfe eines Tiefpaßfilters wird das nun bandpaßgefiltert vorliegende Dopplersignal einem breitbandigen Verstärker mit variabler Verstärkung bzw. Abschwächung zugeführt, um die Signalamplituden auf die fest eingestellten Diskriminierungspegel der nachfolgenden speziellen Triggerlogik anzupassen. Diese Triggerlogik besteht nach einem Vorschlag von /58/ im wesentlichen aus drei Schmitt-Trigger-Stufen, die mit drei unterschiedlichen Referenzpegeln arbeiten, einem positiven Triggerpegel (PTL), einem Nullpegel (Z) und einem negativen Triggerpegel (NTL), vgl. Bild 25. Das bandpaßgefilterte, amplitudenangepaßte Dopplersignal passiert parallel jede dieser drei Pegeldiskriminatoren. Am Ausgang der Pegeldiskriminatoren entstehen drei Pulsfolgen, die für die weitere Signalverarbeitung im Counter von entscheidender Bedeutung sind, da sie die Messungen der mittleren Dopplersignalperiodendauer τ_{Sig} bzw. deren Kehrwert (mittlere Signalfrequenz) gestatten:

$$\tau_{sig} = \tau_T \cdot \frac{N_T}{N_{sig}} \tag{28}$$

$$f_{sig} = \frac{1}{\tau_{sig}} \tag{29}$$

Der Fehler des Zählvorganges ergibt sich als Quantisierungsfehler ε_Q und steigt bei fester Taktperiode τ_T mit der Signalfrequenz f_{Sig} an:

$$\varepsilon_Q = \pm \frac{1}{N_T} = \frac{\tau_T}{N_{sig} \cdot \tau_{sig}} = \frac{1}{N_{sig}} \cdot \frac{f_{sig}}{f_T} \tag{30}$$

Wie in Gleichung (2) angegeben, ist die Signalfrequenz die Summe aus Dopplerfrequenz und Shiftfrequenz.

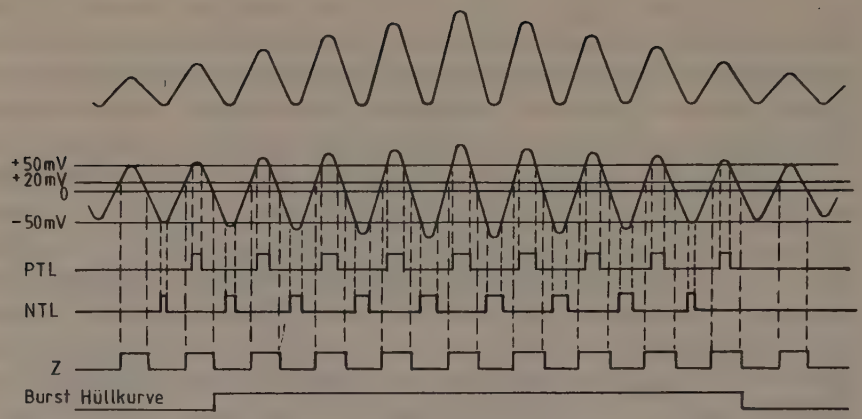


Bild 25: Generierung drei interner Pulsfolgen aus einem Dopplersignal mit Hilfe des Dreipegeldiskriminatorsystems /59/

Gemäß Bild 25 detektiert ein im TSI-Counter integrierter Hüllkurvendetektor einen beginnenden Burst, wenn das Dopplersignal eine vorbestimmte Folge von Triggerpegelüberschreitungen erreicht. Das Signal muß PTL und NTL überschreiten, dann detektiert der Counter mit dem nächsten Nulldurchgang (O V) einen Burstanfang. Mit dem detektierten Burstanfang beginnen zwei Zähler die Anzahl der Nulldurchgänge für die Messung und für die Vergleichsmessung zu zählen. Sind die vorbestimmten Anzahlen von Nulldurchgängen erreicht, oder ist das Burstende erreicht, dann werden die betreffenden Nullstellenzähler abgeschaltet.

Die "End of Burst"-Erkennung verlangt, daß das Signal nach erstmaligem Unterschreiten des positiven oder negativen Triggerpegels noch die + 20 mV Nullstellen-Triggerschwelle überschreitet. Erreicht das Signal das nächste Mal 0 V, dann wird das Burstende erkannt.

Über die Frequenzbestimmung von Dopplersignalen hinaus erlauben die in Bild 25 angedeuteten Pulsfolgen, wie sie am Ausgang des Dreipegeldiskriminatorsystems auftreten, auch die Generierung verschiedener Abschaltkriterien, um verrauschte Signale zu erkennen und zu unterdrücken. Durch den Abschwächer im Countereingangsteil wird die Signalamplitude so eingestellt, daß Rauschen nicht zur Pegelüberschreitung führt. In dieser Einstellung werden keine Pulsfolgen erzeugt.

Über die bereits oben erwähnte Vergleichszählung wird die Taktfrequenz fortlaufend über eine unterschiedliche Anzahl gültiger Dopplerperioden gezählt, z.B. über 5 und über 8 Perioden und die beiden Zählergebnisse miteinander verglichen. Ist die Abweichung $\varepsilon_{5/8}$ kleiner als ein vorgebbarer Prozentsatz, so ist die Messung gültig.

$$\varepsilon_{5/8} = 1 - \frac{\tau_5}{\tau_8} \overset{z.B.}{<} 2\% \qquad (31)$$

Bei den Messungen im gefeuerten Ottomotor betrug die eingestellte maximal zulässige Periodendauerabweichung 2%, um verrauschte Signale mit eventuellen fehlerhaften Nulldurchgängen zu unterdrücken. Es sei angemerkt, daß die Vergleichszählung nicht absolut sicher ist, da beide Periodendauerzählungen rauschbeeinflußt sind, was trotz schlechtem Signal-Rauschverhältnis zufällig zu gültigen Messungen führen kann.

Alle per Hardware im Counter realisierten Rauschkontrollen sind mehr oder weniger ungenau. Es sollte daher von vornherein dafür gesorgt werden, daß Signal-Rauschverhältnisse existieren, bei denen ein Total-Burst-Zähler mit Dreifach-Trigger auch ohne Vergleichszähler die gewünschte Genauigkeit bringt. Dafür muß das Signal-Rauschverhältnis größer als 8 dB sein /60/.

Für jedes gültige Signal werden vom TSI-Counter drei Datenwörter erzeugt und dem Masterinterface übergeben, die Anzahl der gülti-

gen Nullstellen, die simultan dazu gezählte Anzahl der internen Countertaktperioden und die Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Bursts. Da die für zeitliche Korrelationen wichtige Zeit zwischen Bursts für die beabsichtigten Meßaufgaben nicht benötigt wird, kann, wie in Bild 24 angedeutet, die Kurbelwinkelposition des BMW 403 Motors als Absolutwinkel in jenes Latch im Masterinterface eingespeist werden, das normalerweise für die Erfassung der Zeit zwischen Bursts zuständig ist. Da das TSI-Masterinterface die synchronisierte Übertragung von drei Datenwörtern unterstützt, kann auf ein zusätzliches Interface für das Einlesen der Kurbelwinkelinformation in den Computer verzichtet werden. Auf diese Weise wird kostbare Prozessorzeit eingespart, die für das Ansprechen des zweiten Interfaces anfallen würde. Somit ist die für Motorenmessungen wichtige synchrone Erfassung von Geschwindigkeits- und Kurbelwinkelinformationen gesichert.

Neben der guten Synchronisierung von Geschwindigkeits- und Kurbelwinkeldaten ist es bei zeitaufgelösten Motorenmessungen sehr wichtig, daß die Meßdatenrate hoch genug ist. Datenverarbeitungsraten bis zu 100 kHz können nur über einen direkten Speicherzugriff (DMA), der keine Prozessorzyklen benötigt, erreicht werden. Nur im DMA-Betrieb des HP-Parallelinterfaces (Typ 12006A) ist ein ununterbrochener Datenfluß vom Counter zum 512 kbyte großen Kernspeicher des verwendeten HP 1000 (A600+) Computers möglich. Eine spezielle Speicherverwaltung (EMA) ermöglicht darüber hinaus einen ständigen Zugang zum erweiterten Adressierungsraum des 16 bit Computers. Alle diese Anforderungen sind mit der Standardsoftware der Firma Hewlett-Packard lösbar.

Die großen, bei Motorenmessungen anfallenden Datenmengen können mit dem in Bild 24 schematisch gezeigten Datenerfassungssystem in Meßpausen auf ein Magnetband (65 Mbyte) übertragen werden, um für spätere Auswertungen zur Verfügung zu stehen. Bild 26 zeigt das in Bild 24 schematisch angegebene, einkanalige Signalauswertesystem bei ersten Testmessungen am Ottomotor-Prüfstand.

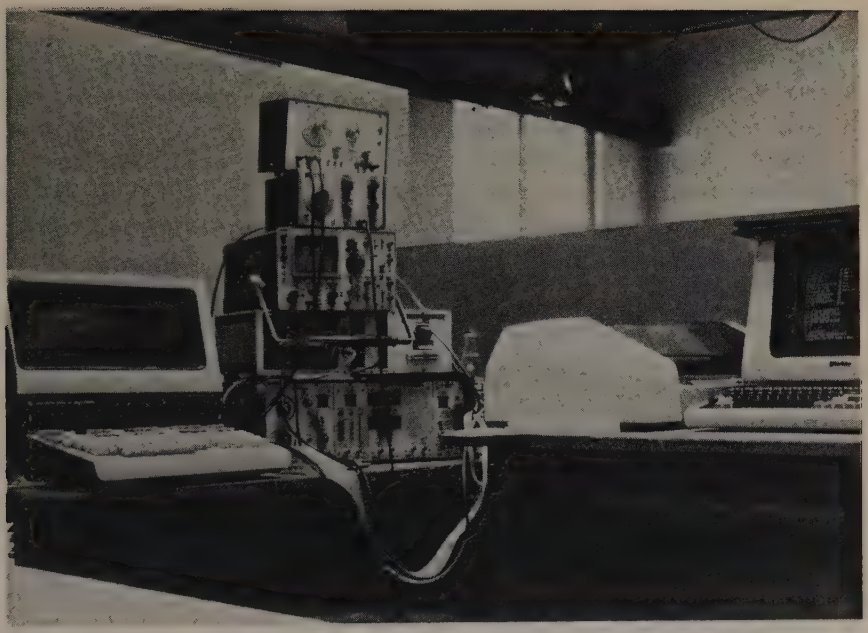


Bild 26: Einkanaliges LDA-Signalauswertesystem mit TSI-Counter (Typ 1990B)

3.3.2.2 Zweikanalige Counterelektronik

Die in dieser Arbeit vorgestellten Messungen in einem geschleppten Modelldieselmotor der Firma SULZER wurden mit einer zweikanaligen TSI-Counterelektronik erhalten. Bild 27 zeigt ein Blockdiagramm des eingesetzten A700 Computersystems der Firma SULZER. Das Computersystem ähnelt im wesentlichen dem in Bild 24 gezeigten, auf einem HP A600+ basierenden einkanaligen Auswertesystem. Neben dem zweiten Counter ist ein 55 kHz A/D-Wandler (Typ HP 12060B) mit einer Synchronisierungselektronik hinzugekommen. Der A/D-Wandler erlaubt eine, mit der zweikanaligen Geschwindigkeitsmes-

sung synchronisierte Analogdatenerfassung maximal acht analoger Größen.

Auf die Counterbetriebsweise wird in diesem Abschnitt nicht mehr näher eingegangen, es wird hier auf Abschnitt 3.3.2.1 verwiesen. Im folgenden wird die bei der Zweikanalelektronik notwendige Synchronisierung der beiden Counter untereinander und zu den Analogdaten mittels einer ADC-Steuerlogik besprochen.

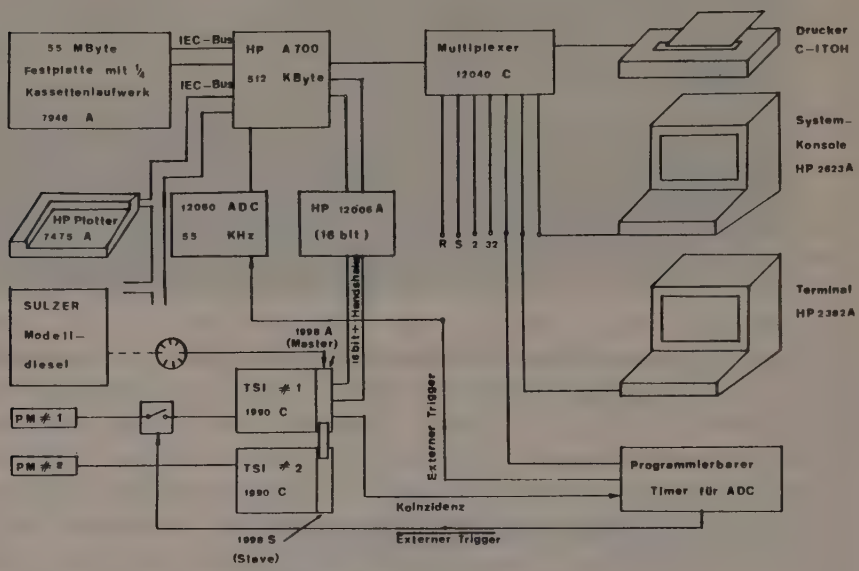


Bild 27: Blockschaltbild der zweikanaligen Auswerteelektronik

Fliegt ein Teilchen durch das Laser-Doppler-Meßvolumen und erzeugt dieses Teilchen ein gültiges Laser-Doppler-Signal in einem der beiden Counter, so sendet dieser Counter einen Data-Ready-Puls an sein Counterinterface der Serie 1998. Im Non-Priority-

Mode ist es gleichgültig, welcher Counter zuerst gültige Daten hat. Mit dem ersten Data-Ready-Puls startet das Masterinterface 1998A das einstellbare Koinzidenzmeßfenster. Erhält das andere Counterinterface während der Koinzidenzzeit ebenfalls einen Data-Ready-Puls, so gilt die Koinzidenzbedingung als erfüllt. Ist die Koinzidenzzeit abgelaufen, bevor jeder Counter eine gültige Messung gemeldet hat, so ist die Koinzidenzbedingung verletzt. Dann werden beide Counterinterface in den Anfangszustand zurückgesetzt. Dabei werden bereits vorliegende Daten gelöscht, ohne daß eine zuvorige Übertragung erfolgt ist. Bei erfüllter Koinzidenzbedingung generiert das Masterinterface intern einen Koinzidenzpuls, um die Datenübertragung zum Rechner zu starten. Dieser Koinzidenzpuls wird herausgeführt und zum programmierbaren Timer des A/D-Wandlers geführt. Der Timer startet den A/D-Wandler (ADC) und öffnet gleichzeitig die Signalleistung zwischen Photomultiplier #1 und Counter #1. Hiermit sind beide Counter gesperrt, da die Koinzidenzbedingung von einem Counter allein nicht erfüllt werden kann.

3.3.3 Streuteilchen

Optische Geschwindigkeitsmeßgeräte, die gegenüber mechanischen Sonden viele Vorteile aufweisen, erlauben die Erfassung der lokalen Geschwindigkeit kleiner, der Strömung zugegebener Streuteilchen. Unter der Voraussetzung, daß die Größe der Streuteilchen klein genug ist, folgen diese Teilchen den auftretenden Strömungsvorgängen mit sehr guter Genauigkeit. Die antreibende Kraft der Teilchen resultiert aus dem Schlupf der Teilchen gegenüber der Strömung. Ist die Schlupfgeschwindigkeit um Größenordnungen geringer als die Strömungsgeschwindigkeit, so folgen die Teilchen in guter Näherung.

Neben dem guten Folgevermögen müssen die Teilchen auch gute Streueigenschaften aufweisen, um in der Laser-Doppler-Anemometrie Einsatz finden zu können, siehe /61, /62/ und 63/.

Die Streuleistung der Teilchen vergrößert sich bis zur Teilchengröße von etwa 1 µm mit der sechsten Potenz des Teilchendurchmessern, über der Teilchengröße von etwa 1 µm nur noch quadratisch mit der Teilchengröße. Neben der Teilchengröße hängt die Streuleistung jedoch auch stark von der Beobachtungsrichtung bei vorgegebener Beleuchtungsrichtung ab. Eine weitere Abhängigkeit betrifft das Teilchenmaterial und der Teilchenform.

Eine theoretische Berechnung der Streuleistung ist für kugelförmige Teilchen möglich /64/, diese theoretische Näherung benötigt jedoch eine Angabe des Teilchendurchmessers. Theoretische Überlegungen wie auch praktische Messungen zeigen /62/, daß mit 1 µm großen Streuteilchen gute Meßsignalqualitäten erreicht werden, wobei um Verfälschungen von Geschwindigkeitsmessungen (biasing) zu vermeiden, möglichst monodisperse Streuteilchengrößenverteilungen gewünscht werden.

Kommerzielle Teilchengeneratoren kommen dieser Forderung teilweise recht nahe, sie sind jedoch vom Preis in vielen Anwendungen nicht akzeptabel, so daß in der Praxis häufig billige Spraygeneratoren Einsatz finden.

Bei den in Abschnitt 3.2.2.2 angegebenen Signal-Rauschmessungen der Prototyp-Sonde im Freistrahl sowie bei der Inbetriebnahme aller in Tabelle 2 genannten Sonden wurden aus Preisgründen mit Wasser gefüllte Zerstäuber, sogenannte Inspiron Vernebler mit Heizstabanschluß (Typ 002305) eingesetzt, wie sie in der medizinischen Technik als Einweg-Inhalatoren bekannt sind. Das Teilchengrößenspektrum dieser Partikelgeneratoren ist vom Betriebsdruck nahezu unabhängig, was in verschiedenen Meßreihen mit verschiedenen Generatoren überprüft wurde, siehe Bild 28.

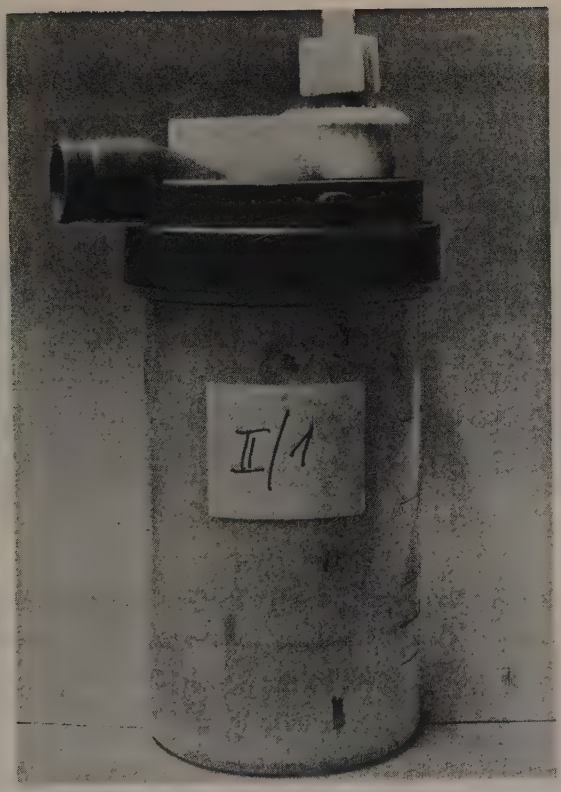


Bild 28: Inspiron-Vernebler für die Labormessungen

Den Meßaufbau, der für die Bestimmung sowie für die Auswertung und bildliche Darstellung der Teilchengrößenspektren der verschiedenen Flüssigkeitsteilchengeneratoren und Teilchenmedien benutzt wurde, ist in Bild 29 gezeigt. Das Meßprinzip der angewandten Teilchengrößenbestimmung beruht auf der größenabhängigen Trägheit eines Streuteilchens in einer geräteinternen Beschleunigungsstrecke (Meßdüse). Abhängig von der Teilchengröße werden

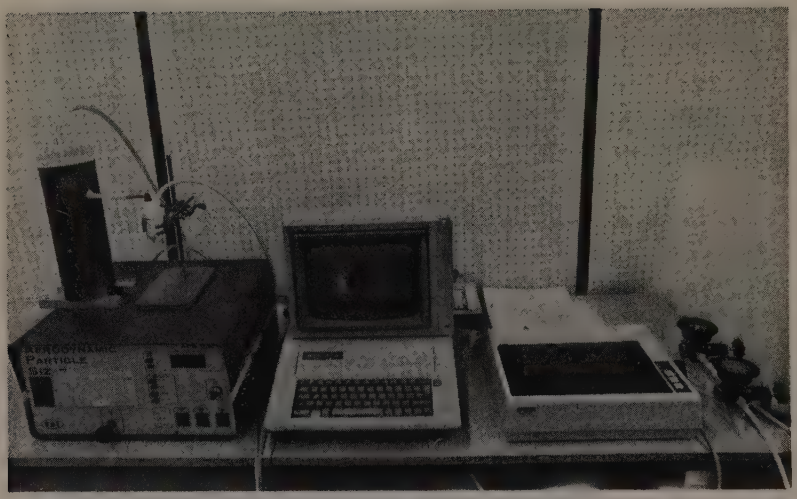


Bild 29: Meßaufbau für die Teilchengrößenbestimmung verschiedener Teilchengeneratoren, Teilchenmedien und Betriebsdaten

in der Meßdüse unterschiedliche Teilchenflugzeiten gemessen, welche ein indirektes Maß für den aerodynamischen Teilchendurchmesser darstellen. Bei kugelförmigen, homogenen Teilchen ist dieser aerodynamische Durchmesser etwa ein Maß für die reale Teilchengröße. Bei inhomogenen Teilchen, z.B. sogenannten Microballons, können dagegen große Abweichungen von der realen Teilchengröße auftreten. Bild 30 zeigt eine mit dem TSI-Particle-Sizer über 20 Sekunden gemessene Teilchengrößenverteilung für den in Bild 28 abgebildeten Vernebler. Der Betriebsdruck betrug 0.25 bar, das Teilchenmedium war Wasser.

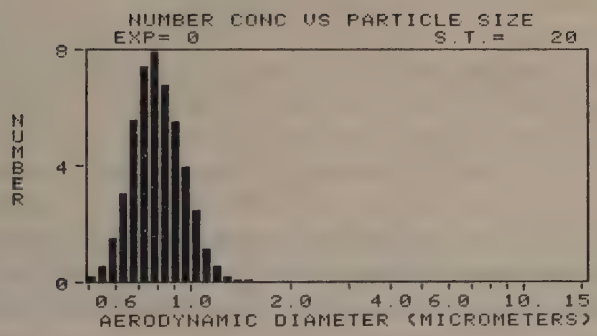


Bild 30: Teilchengrößenverteilung des Wasserzerstäubers II/1 bei einem Betriebsdruck von 0.25 bar und einer Meßzeit von 20 Sekunden

Für die Teilchenversorgung des geschleppten Modell-Dieselmotors wurden bei SULZER leistungsstarke Zerstäuber der Firma DELIMON in Düsseldorf nach eigenen Vorstellungen umgebaut, wobei insbesondere die komplette Zerstäuberstrecke umkonstruiert wurde. Die Wirksamkeit der Umbaumaßnahmen bestätigte eine Teilchengrößenspektrumsmessung, vorgenommen nach einer Streulichtmethode. Gemäß dieser Untersuchung lag die mittlere Teilchengröße bei 0.8 µm. Das Teilchenmaterial war ein Silikonöl der Marke SHELL Odina.

Die geeignete Wahl des Streuteilchenmediums sowie die Art und Weise der Teilchengenerierung und Teilchenzugabe stellen ein großes Problem bei der Anwendung von LDA-Systemen in gefeuerten Verbrennungsmotoren dar. Problematisch ist das Erreichen einer hohen Partikelkonzentration bei gleichzeitig geforderter geringer Fensterverschmutzung. Die hohe Partikelkonzentration ist aufgrund der angestrebten hohen zeitlichen Auflösung der Strömungsvorgänge im Motor notwendig. Ausgehend von einer gewünschten Datenrate $\dot{N}$, läßt sich durch Umformung von Gleichung (32)

$$\dot{N} = c_V \cdot U_{min} \cdot L_{MV} \cdot \phi_{MV} \tag{32}$$

eine Volumenkonzentration c_V (Anzahl der Partikel pro Volumen) bestimmen:

$$c_V = \frac{\dot{N}}{U_{min} \cdot L_{MV} \cdot \phi_{MV}} \tag{33}$$

Hierbei bezeichnen U_{min} die minimal mit der geforderten Auflösung zu messende Geschwindigkeit, L_{MV} die Meßvolumenlänge sowie ϕ_{MV} den Meßvolumendurchmesser. Bei einem mittleren Partikelvolumen V_{1P} (etwa 1 µm³) läßt sich über den angesaugten Luftvolumenstrom $\dot{V}_L$,

$$\dot{V}_L = n \cdot V_H \cdot \frac{2}{T} \tag{34}$$

wobei n die Motordrehzahl, V_H das mit Teilchen zu beaufschlagende Hubvolumen und T die Anzahl der Arbeitstakte darstellt, der notwendige Partikelvolumenstrom berechnen:

$$\dot{V}_P = \dot{V}_L \cdot c_V \cdot V_{1P} \tag{35}$$

Wie aus Gleichung (35) in Verbindung mit Gleichung (33) zu erkennen ist, verhält sich der notwendige Partikelvolumenstrom $\dot{V}_p$ umgekehrt proportional zur minimal zu messenden Geschwindigkeit U_{min}.

Die Berechnung des notwendigen Partikelvolumenstroms für die Ottomotormessungen ergibt beispielsweise für eine Drehzahl von n = 1200 1/min, für eine geforderte Datenrate von N = 100 kHz, sowie für eine minimale Geschwindigkeit von U_{min} = 0.1 m/s einen Partikelvolumenstrom $\dot{V}_P$ = 50 mm³/s. Dieser vergleichsweise recht hohe Teilchenvolumenstrom verursacht neben einer guten Datenrate jedoch eine verstärkte Zunahme der Fensterverschmutzung. Die Fensterverschmutzung wiederum kann über eine geeignete Wahl des Teilchenmediums soweit reduziert werden, daß Meßzeiten bis 30 Minuten zwischen zwei Fensterwechselvorgängen erreicht werden.

Das Teilchenmaterial sollte natürlich in erster Linie gute Lichtstreueigenschaften aufweisen. In dieser Hinsicht empfiehlt sich die Verwendung von Titandioxid. Dem Vorteil bezüglich der Streueigenschaften steht als Nachteil die hohe Agglomerationsneigung gegenüber sowie die zumeist hohe statische Aufladung, welche zu schnellen Fensterverschmutzungen führt. Hinzu kommt ein struktureller Nachteil von Titandioxid. Übliche Titandioxid-Teilchen besitzen zumeist eine Einzelteilchengröße von nur 0.2 µm bis 0.4 µm. Deshalb treten häufig Agglomerate vieler Einzelteilchen auf, wie aus Bild 31, das mit einem Rasterelektronenmikroskop mit 16000-facher Vergrößerung aufgenommen ist, zu erkennen ist.

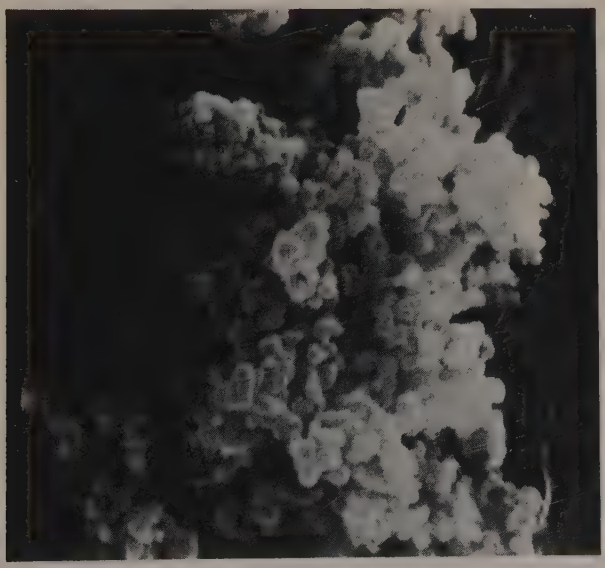


Bild 31: Titandioxidagglomerate in 16000-facher Vergrößerung (1 µm = 12.6 mm)

Verschiedene Teilchenmaterialien wurden untersucht, darunter neben Titandioxid und Titandioxid mit Aerosil auch verschiedene Metallpulver wie Wolframpulver, Kupferpulver und Bronzepulver. Weiterhin wurden verschiedene Schleifmittel, Flugasche in verschiedenen Körnungen, Magnesiumdioxid, verschiedene Glaspulver und Kaolin untersucht. Gerade die beiden letztgenannten Pulversorten liefern ebenso gute Doppler-Signalqualitäten wie Titandioxid und die Teilchengröße liegt im gewünschten Bereich zwischen 1 µm und 2 µm. Im Fall des Glaspulvers fällt sogar eine ausgeprägte kugelförmige Teilchengestalt positiv auf, vgl. Bild 32.

Bild 32: Glaskugeln und Titandioxid in 16000-facher Vergrößerung (1 µm = 12.6 mm)

Doch gerade Glaspulver besitzt ein für Motorenanwendungen unmöglich zu tolerierendes abrasives Verhalten. Hier genügen kleinste Mengen, damit der Motor in kurzer Zeit (zwei Minuten) aufgrund lokaler Schmierfilmunterbrechungen zu verstärkter Geräuschemittierung neigt. Aus diesem Grund wurde das Kaolinpulver (Typ F1) der Amberger Kaolinwerke für die Messungen im gefeuerten Ottomotor verwendet. Die aerodynamisch gemessene Teilchengrößenverteilung dieses Kaolinpulvers kann Bild 33 entnommen werden.

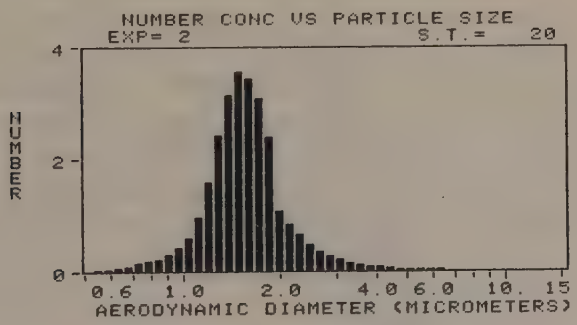


Bild 33: Teilchengrößenverteilung des Kaolinpulvers bei einer Meßzeit von 20 Sekunden

Nicht nur die Art der Streuteilchen ist von Bedeutung, sondern auch die Teilchenerzeugung und -zugabe in die Strömung. Konventionelle Teilchengeneratoren benötigen Trägerluft zum Transport der Partikel. Bei Zugabe nach der Gemischerzeugungsanlage reagiert ein Ottomotor auf diese Nebenluft sehr empfindlich mit Gemischabmagerungserscheinungen, weshalb mit käuflichen Partikelgeneratoren im gefeuerten Motor nur eine vergleichsweise geringe Datenrate erreicht wird. Höhere Datenraten erfordern einen erhöhten Volumenstrom der Trägerluft, um Verstopfungseffekte im Generator zu verhindern. Dabei treten die erwähnten Störungen des motorischen Betriebs auf. Diesen Effekt vermeidet die erstellte und

eingesetzte drucklose Art der Teilchenzugabe, bei welcher der Motor keine schädliche Nebenluft erhält. Diese Lösung basiert auf einer Streuteilchenzugabe durch den Einfluß der Schwerkraft. Am Ansaugrohr nahe dem Zylinderkopf befand sich ein Stutzen, auf den, mittels einer Muffe, die in Bild 34 schematisch dargestellte Zylinder/Kolben-Kombination mit 10 mm Durchmesser adaptiert werden kann.

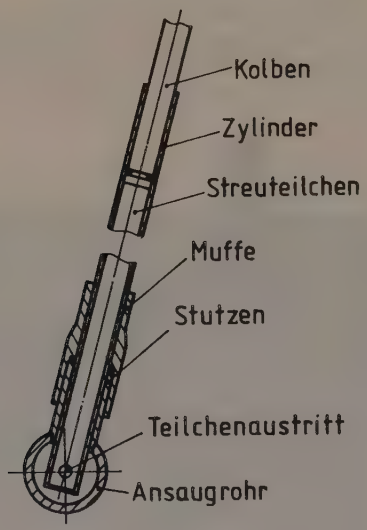


Bild 34: Teilchenzugabe am Saugrohr

Der Versuchsablauf bezüglich der Streuteilchenzugabe wird im folgenden beschrieben.

Der mit Streuteilchen gefüllte Zylinder wurde vor einer Messung auf den Stutzen gesteckt. Der während der Messung "kontinuierlich" von Hand eingeschobene Kolben bewirkte mehrere Sekunden lang eine starke Teilchenbeladung der Ansaugströmung. Signalraten

bis zu 100 kHz wurden erreicht, was bei einer Drehzahl von 1200 1/min im Mittel bis zu zehn Signalen pro Grad Kurbelwinkel entsprach. Diese Datenrate reichte aus, um auch in den unteren Totpunkten noch eine zeitliche Auflösung entsprechend 1° KW sicherzustellen.

Verwendet wurde Kaolinpulver, das sich im Motor recht abrasiv auswirkte, insgesamt aber deutlich längere Motorlaufzeiten zuließ als Glaspulver. Trotz täglichem Schmierölwechsel, um die angesammelten Verunreinigungen zu entfernen, stieg im Laufe der Versuche die Durchblasemenge ins Kurbelgehäuse kontinuierlich an. Schließlich trat ein leichter Kolbenfresser auf, der weitere Messungen verhinderte. Dies bedeutete, daß der Motor am Ende eines etwa achtstündigen Meßeinsatzes eine Kontrolle bzw. Überholung der beweglichen Teile benötigte. In dieser Zeit wurden jedoch eine große Zahl gültiger Messungen erreicht, von denen die vorliegende Arbeit nur einen kleinen Ausschnitt zeigen kann, vgl. Abschnitt 5.1.

4. PRÜFSTÄNDE

Die Anwendung der Laser-Doppler-Anemometrie zur Messung der Ladungsbewegung in Verbrennungsmotoren erfordert Prüfstände, die für die Laserstrahlen einen optischen Zugang zum Brennraum aufweisen müssen. Dieser Zugang muß so angeordnet sein, daß der durch lokale Messungen abzudeckende Bereich erfaßt werden kann. Darüber hinaus verlangt die erfolgreiche Anwendung des Meßprinzips das Vorhandensein genügend geeigneter Streuteilchen. Liegen diese Teilchen nicht in der gewünschten Größe und Konzentration in der betrachteten Strömung vor, so müssen sie extern aufbereitet und der Strömung zugegeben werden, siehe Abschnitt 3.3.3. Die folgenden Unterkapitel beschreiben die beiden Motorenprüfstände, bei denen die vom Autor entwickelte Sondenmeßtechnik für LDA-Messungen zum Einsatz gelangte.

4.1 Gefeuerter Ottomotor-Prüfstand

Der ottomotorische Versuchsstand entstand am Institut für Kolbenmaschinen von Prof. Jungbluth der Universität Karlsruhe (TH), wo er von den dortigen Mitgliedern des Instituts - zur Durchführung des gemeinsam mit der Laser-Doppler-Gruppe von Prof. Durst bearbeiteten FVV-Projektes "Einlaßturbulenz" - erstellt wurde. Der Versuchsträger, ein Einzylinder-Viertakt-Ottomotor vom Typ BMW 403 war über eine Elastikwelle mit einer drehzahlgeregelten Gleichstrom-Pendelmaschine verbunden, siehe Bild 35.

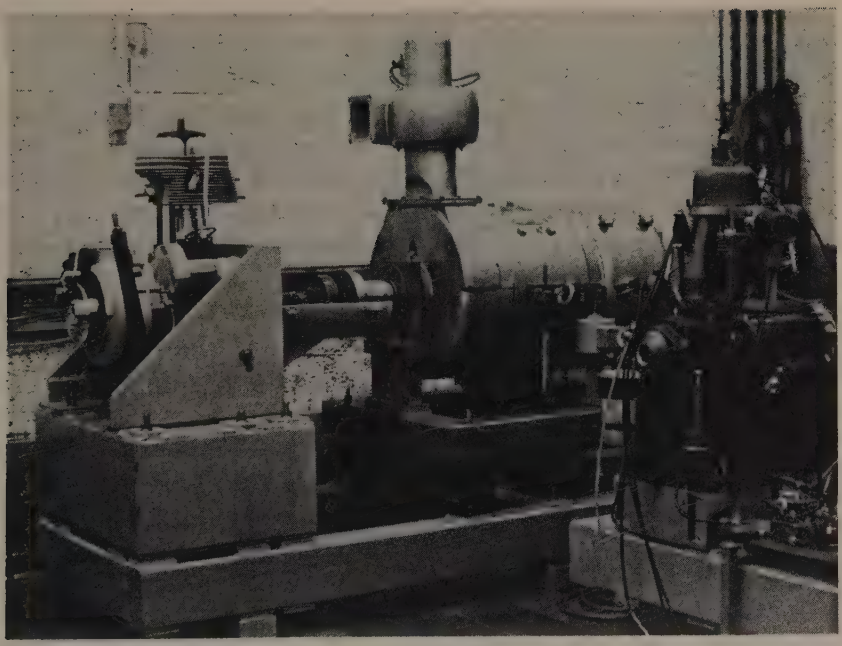


Bild 35: BMW 403 Motorprüfstand mit angeflanschter Pendelmaschine

Bei dem BMW-Motor handelt es sich um einen modifizierten luftgekühlten Stoßstangenmotor mit im Zylinderkopf hängenden Ventilen und halbkugelförmigem Brennraum, wie er in verschiedenen Leistungs- und Entwicklungsstufen in verschiedenen Generationen von BMW-Motorrädern und im Kleinwagen BMW Isetta eingebaut war.

Der Zylinderkopf ist samt Kipphebel mittels vier durchgehender Schrauben auf dem Zylinder aufgeschraubt. Die beiden Kipphebelklammern sind mit je einer Ventilhaube und einem gemeinsamen Spannbügel öldicht verschlossen /65/. Um den Brennraum weitgehend von Öl freizuhalten, werden die Kipphebel mit Molykote geschmiert, Nocken und Stößel werden mit einer externen Tropf-

schmierung versorgt. Die Form und Größe des Brennraums im Zylinderkopf wird durch diese Nacharbeiten nicht beeinflußt.

Der Zylinder ist ein vom Institut für Kolbenmaschinen in Karlsruhe (TH) konstruiertes und gefertigtes Spezialteil aus Grauguß, das, zum Zwecke des optischen Zugangs für die Laserstrahlen in den Brennraum, mit eingesetzten Glasfenstern ausgerüstet ist. Wegen einer von 72 mm auf 60 mm verringerten Bohrung wies der Motor statt 298 cm³ nur noch ein Hubvolumen von 206,4 cm³ auf, vgl. Tabelle 3. Ein externes leistungsstarkes Gebläse sorgt für eine ausreichende Kühlung von Zylinderkopf und Zylinder. Die in Bild 35 gezeigte, mit dem Motor verbundene Pendelmaschine erlaubt einen vierquadrantigen Betrieb des BMW-Motors bis zu einer maximalen Drehzahl von 2900 1/min. Die für die Bestimmung der Last wichtige Drehmomentmessung erfolgt über eine Kraftmeßdose. Der Motor ist starr gelagert, um im Betrieb jede Relativbewegung des Motors zur Optik zu vermeiden. Die wichtigsten technischen Daten des Motors können der Tabelle 3 entnommen werden.

Hub	73 mm
Bohrung	60 mm
Hubvolumen	206,4 cm³
Drehzahl	1300 1/min, 2000 1/min
Einlaß öffnet	6 ° nach OT
Einlaß schließt	34 ° nach UT
Auslaß öffnet	34 ° vor UT
Auslaß schließt	6 ° vor OT

Tabelle 3: Technische Daten des BMW 403 Ottomotors

Um das Prinzip der Laser-Doppler-Anemometrie zur Messung der Gasgeschwindigkeit im BMW 403 Motor anzuwenden, muß der Motor entsprechend vorbereitet werden. In der Hauptsache muß für einen

optischen Zugang der Laserstrahlen in den Arbeitsraum und für das Vorhandensein von kleinen Streuteilchen in der Strömung gesorgt werden. Zum Zwecke des optischen Zugangs ist es aus konstruktiven Gründen nicht möglich, oberhalb der OT-Stellung des Kolbens im Zylinder ein Glasfenster einzubauen. Aus diesem Grund kann in OT-Stellung des Kolbens nicht gemessen werden, da dann das in den Zylinder eingebaute Planglasfenster vom Kolben verdeckt ist, siehe Bild 36. Ein unvermeidlicher Nachteil ebener, nicht abgesetzter Fenster besteht darin, daß vor dem Fenster im Inneren des Brennraumes ein Totraum entsteht, in den Luft einströmen und somit das Strömungsbild in Randnähe verfälschen kann. Vorteilhaft ist, daß die Glasfenster bei Verschmutzung ohne Kopfdemontage leicht und schnell gewechselt werden können. Da hierbei kein Kolbenring den Fensterbereich überstreichen darf, muß der erste Kolbenring weggelassen werden. Es kann wegen der begrenzten Fensterapertur und abhängig vom Winkel der sich kreuzenden Strahlen, vgl. Tabelle 2, nur maximal etwa 60% des Zylinderdurchmessers vermessen werden. Wie oben bereits angedeutet, verdeckt der Kolben von ca. 40° KW vor OT bis 40° KW nach OT das Fenster. Die verwendeten Fenster bestehen aus Quarzglas, das infolge der thermischen und mechanischen Festigkeit problemlos einen gefeuerten Betrieb des Motors erlaubt.

Bei gefeuertem Motor verschmutzen in der Brennraumwand eingebaute Fenster innerhalb weniger Betriebsminuten. Diese Verschmutzung kann verschiedene Ursachen haben. Verbrennungsbedingte Ablagerungen und Ablagerungen von Streuteilchen wirken sich gleichermaßen schädlich auf die mögliche Meßzeit mit laseroptischen Anemometern aus, wie unverbrannte Kraftstofftröpfchen oder kondensierter Wasserdampf /22/. Bei der verbrennungsbedingten Fensterverschmutzung hilft die Benutzung bleifreien Normalbenzins, mit dem es gelingt, bläuliche Ablagerungen auf der Innenseite des Quarzfensters zu unterdrücken. Durch die Benutzung von Kaolinpulver, vgl. Abschnitt 3.3.3, reduziert sich ferner die teilchenbedingte Verschmutzung. Durch den Einsatz der untenstehend beschriebenen Kraftstoffverdampfungsanlage erhöhen sich bei betriebswarmem

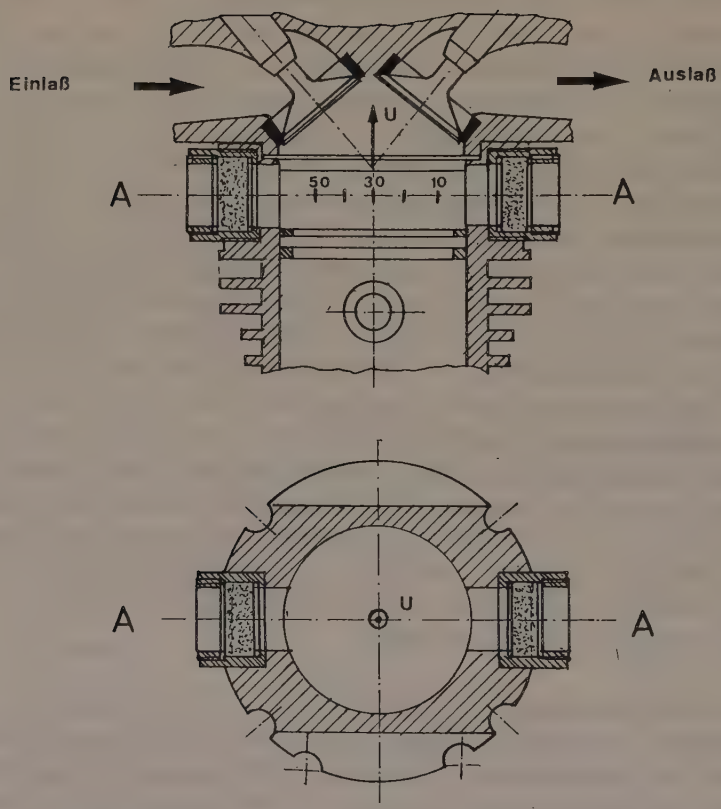


Bild 36: Seitenansicht und Draufsicht der in der Fensterebene geschnittenen Zylinderhälfte des BMW 403 Motors mit Angabe der Meßachse A-A und der positiven Geschwindigkeitsrichtung U

Motor die Fenstereinsatzzeiten, also die Zykluszeiten zwischen zwei notwendigen Fensterreinigungen von einer auf etwa 20 bis 30 Minuten.

Mit dem serienmäßigen Vergaser traten Streuteilchenagglomerationen um Kraftstofftröpfchen auf. Diese Streuteilchenagglomerationen verhinderten sowohl das Erreichen einer hohen Datenrate wie auch einer langen Meßzeit. Aus diesem Grund war am Versuchsstand in Karlsruhe eine Kraftstoffverdampfungsanlage nach dem Vorbild des FVV-Arbeitskreises "Entflammungsphase" (Prof. Müller, Braunschweig) installiert, siehe Bild 37.

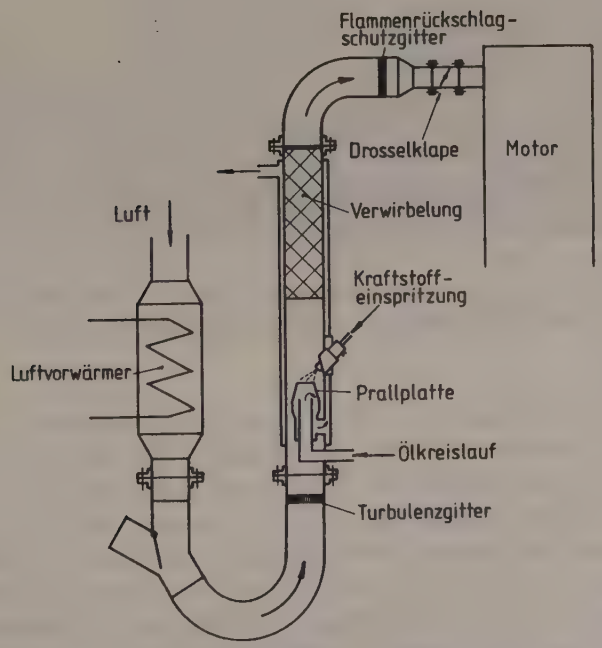


Bild 37: Prinzipskizze der Kraftstoffverdampfungsanlage

Dieses Bild zeigt schematisch die wichtigsten Teile der Verdampferanlage, die neben dem positiven Einfluß auf die mögliche Meßzeit und die mögliche Datenrate auch die Gemischzusammensetzung homogener gestaltete.

Die Luftzuführung erfolgt über eine elektrisch beheizte Vorwärmstrecke, die die Ansaugluft auf 130° C bis 150° C aufheizt. Das nachfolgende Turbulenzgitter hat die Aufgabe, Temperaturgradienten über dem Kanalquerschnitt zu verringern, um eine gleichmäßige Kraftstofftröpfchenverdampfung zu ermöglichen. Im nächsten Abschnitt der Verdampfungsanlage erfolgt die Kraftstoffeinspritzung auf eine ölbeheizte Prallplatte. Das Öl, das die Prallplatte auf 80° C temperiert, beheizt auch die Kanalwand im eigentlichen Kraftstoffverdampfungsteil, um zu verhindern, daß bereits verdampfter Kraftstoff wieder auskondensiert. Engmaschige Einbauten sorgen im weiteren Ansaugweg einerseits für eine homogenere Gemischverwirbelung und verhindern andererseits einen möglichen Flammenrückschlag aus dem Verbrennungsraum. Nach der Drosselklappe vor dem Eintritt in den Zylinderkopf betrug die Gemischtemperatur während der Messungen etwa 80° C.

Zur Erfassung des Kurbelwinkels diente ein Absolutwinkelgeber mit 360 Schritten pro Umdrehung und einer Genauigkeit von 0.1° KW. Dieser Winkelmarkengeber ist in Bild 38 gezeigt.

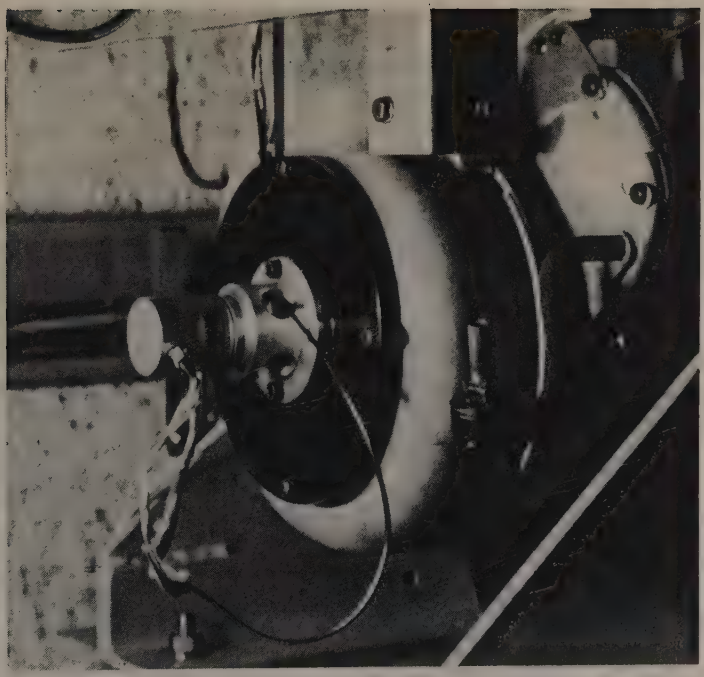


Bild 38: Absolutwinkelgeber am BMW 403 Versuchsmotor

Um jedoch in einem vollständigen Viertakt-Zyklus von 720° KW den Zünd-OT (360° KW) vom Einlaß-OT (0° KW) unterscheiden zu können, ist eine weitere Marke notwendig. Der Zündimpuls ist dazu nicht geeignet, da der Motor bei jeder Kurbelwellenumdrehung zündet. Die unten im Triebwerk liegende Nockenwelle ist schwer zugänglich, deshalb wurde die in diesem Motor freiliegende Stößelstange des Einlaßventils mit einer Markierungsfahne versehen. Diese Fahne wird in einem Längsschlitz geführt und die Stellung mit einer Lichtschranke abgetastet, vgl. Bild 39.

Bei 36° KW nach Gaswechsel-OT springt das Lichtschrankensignal von "Low" auf "High" und 160° KW später, also bei 164° KW vor Zünd-OT, springt es wieder zurück auf den Pegel "Low". Der nachfolgende OT-Impuls ist dann eindeutig der Zünd-OT.

Bild 39: Markierungsfahne zur Erkennung des Zünd-OT

4.2 Geschleppter Dieselmotor-Prüfstand

Der dieselmotorische Versuchsstand steht in der strömungstechnischen Abteilung der Firma Gebr. SULZER in Winterthur (Schweiz). Es handelt sich um einen Einzylinder-Zweitakt-Dieselmotor, der von einem drehzahlgeregelten Elektromotor mit einer Drehzahl von 240 1/min geschleppt wird. Gemessen am Vorbild der großen SULZER-Zweitakt-Schiffsdieselmaschinen stellt der Versuchsmotor ein etwa zwei- bis vierfach verkleinertes Modell dar. Die technischen Daten der Kreuzkopfmaschine, die 30 kolbengesteuerte Einlaßschlitze und ein zentrales Auslaßventil aufweist, können der Tabelle 4 entnommen werden. Der in Tabelle 4 gleichfalls angegebene resultierende Zeitquerschnitt der Spülschlitze ist definiert als das zeitliche Integral des Spülschlitzquerschnitts über die Spülphase.

Hub	190 mm
Bohrung	162 mm
Schubstangenlänge	325 mm
Hubvolumen	3916 cm^3
Drehzahl	240 1/min
mittlere Kolbengeschwindigkeit	1.52 m/s
Auslaßventil auf	76.85 °KW vor UT
Spülschlitze auf	52 °KW vor UT
Spülschlitze zu	52 °KW nach UT
Auslaßventil zu	73.15 °KW nach UT
resultierender Zeitquerschnitt	1.0772 cm^2s

Tabelle 4: Technische Daten des Modell-Dieselmotors

Dieser SULZER-Forschungsmotor eignet sich in idealer Weise für die Anwendung der Laser-Doppler-Anemometrie, da er vier verschiedene optische Zugänge zum Brennraum aufweist, drei Fenster im

Zylinder und ein Fenster im Kolbenboden, siehe Bild 40. Die vier in Bild 40 angedeuteten Strahlengänge zeigen, welche Strömungskomponenten durch die verschiedenen Fenster mit optischen Verfahren wie der Laser-Doppler-Anemometrie oder des Dual-Fokus-Verfahrens gemessen werden können. Die in Bild 40 durch Unterstreichen hervorgehobenen Fenster 1 und Fenster 4 stellen diejenigen Meßfenster dar, durch die die in Abschnitt 5.2 vorgestellten Messungen erhalten wurden.

Beim Modelldieselmotor entsteht, aufgrund des geringen Verdichtungsverhältnisses, im oberen Teil des Zylinders ein genügender Freiraum, um oberhalb der OT-Stellung des Kolbens ein Sichtfenster im Zylinder einzubauen. Dadurch kann auch das interessante Geschwindigkeitsprofil bei OT-Stellung des Kolbens gemessen werden, was aus den bereits erwähnten Gründen beim Ottomotor nicht möglich war.

Bild 41 zeigt eine Ausschnittsvergrößerung des strichpunktiert markierten Bereichs von Bild 40. In Bild 41 ist die obere Meßachse durch Fenster 1 mit Angabe der Meßpositionszahlen und der mit (1) indizierten positiven Geschwindigkeitskomponentenfestlegung der Messungen eingezeichnet. Die durch Fenster 4 vermessene Spülschlitzaustrittsebene kann in Bild 41 nicht eindeutig eingezeichnet bzw. identifiziert werden, wohl aber die Festlegung der positiven mit (4) indizierten Koordinatenrichtungen der gemessenen Geschwindigkeitskomponenten. Die aus Bild 41 ebenfalls ersichtliche Kippung der optischen Achse um 6.4° gegen die Vertikale begründet sich aus der Forderung eines minimalen Meßabstandes von der Zylinderwand. Die durch die Kippung verursachte Meßwertverfälschung der radialen Geschwindigkeitskomponente $U_{(4)}$ kann wegen des kleinen Kippwinkels vernachlässigt werden; der auftretende systematische Meßfehler liegt dann bei 0.6%. Auf die Meßgenauigkeit der horizontalen $V_{(4)}$-Komponente bleibt die Anemometer-Kippung ohne Einfluß.

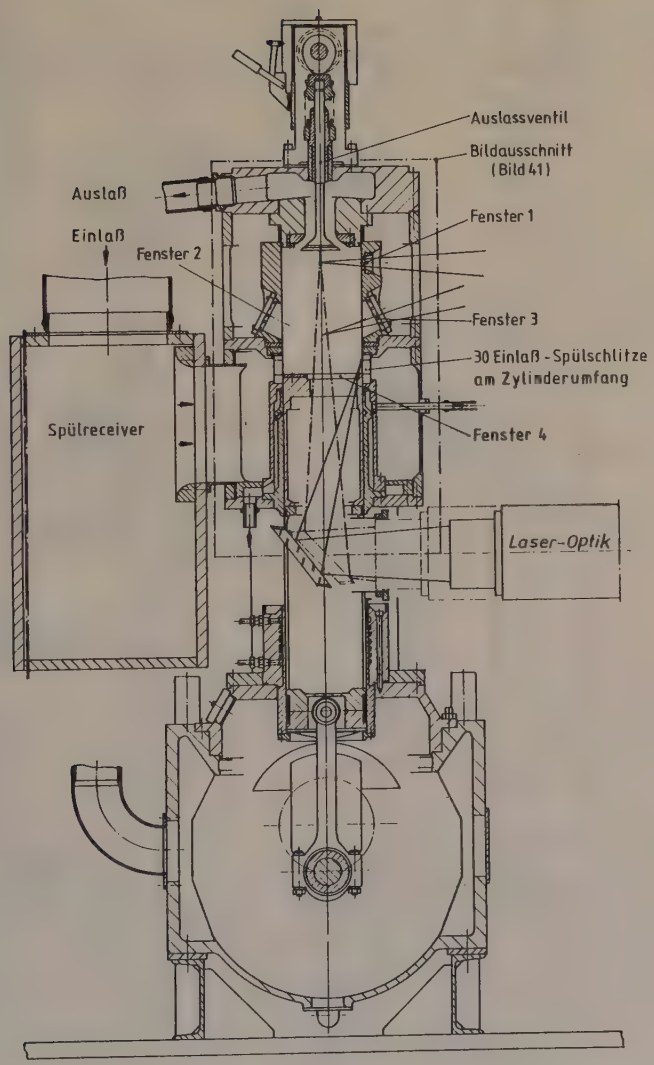


Bild 40: Schnittzeichnung des Modelldieselmotors mit Angabe der vier Meßfenster

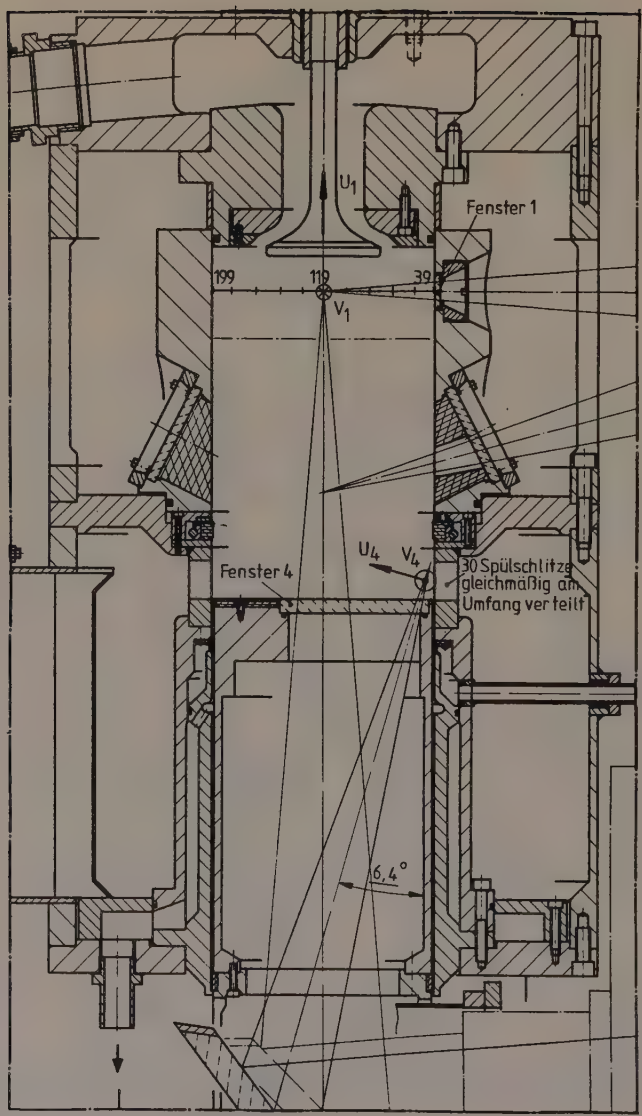


Bild 41: Vergrößerte Schnittdarstellung des Arbeitsraumes mit Angabe der Meßfenster, der positiven Koordinatenrichtungen und der Meßachse 1

Der minimal mögliche Meßabstand beträgt aufgrund der Wandstärke des Kolbenhemdes 8.03 mm, wie in Bild 42 skizziert ist.

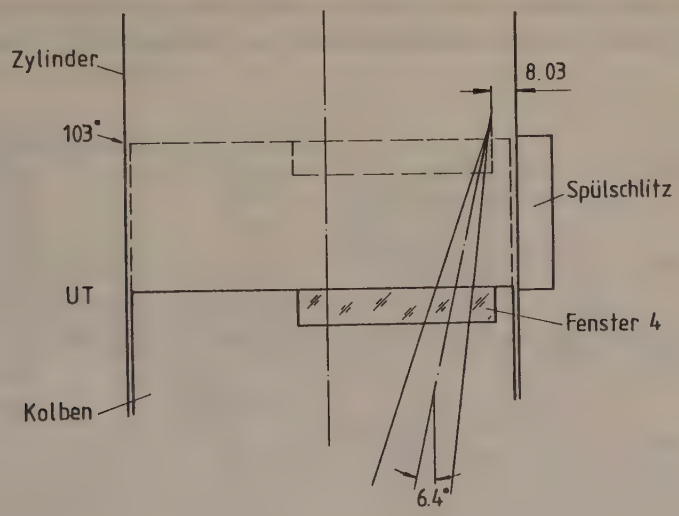


Bild 42: Skizze der Einbauposition von Fenster 4 mit Andeutung des minimalen Wandabstandes zwischen Spülschlitz und Meßvolumen, sowie der erforderlichen Kippung der optischen Achse

Die Wandstärke des Kolbenhemdes wirkt sich insbesondere in der gestrichelt angedeuteten Kolbenposition bei "EÖ" oder "ES" nachteilig auf einen kleineren möglichen Wandabstand aus. Diese Position entspricht, gemäß Tabelle 4, einer Kurbelwellenstellung von 52° KW vor oder nach UT.

Die Anordnung der 30 gleichmäßig am Umfang verteilten Spülschlitze sowie die Spülschlitzabmessungen können Bild 43 entnommen werden. In der oberen Bildhälfte ist ein Schnitt in Richtung der Zylinderachse gezeigt, in der unteren Bildhälfte ist eine teil-

weise geschnittene Draufsicht auf den Spülschlitzeinsatz angegeben. Eine vergrößerte Darstellung eines Spülschlitzquerschnitts zur Erläuterung der untersuchten Meßorte, die gemäß Bild 42 alle einen Abstand von etwa 8 mm zur Zylinderinnenwand aufweisen, wird in Abschnitt 5.2 zur Erläuterung der Meßergebnisse angegeben.

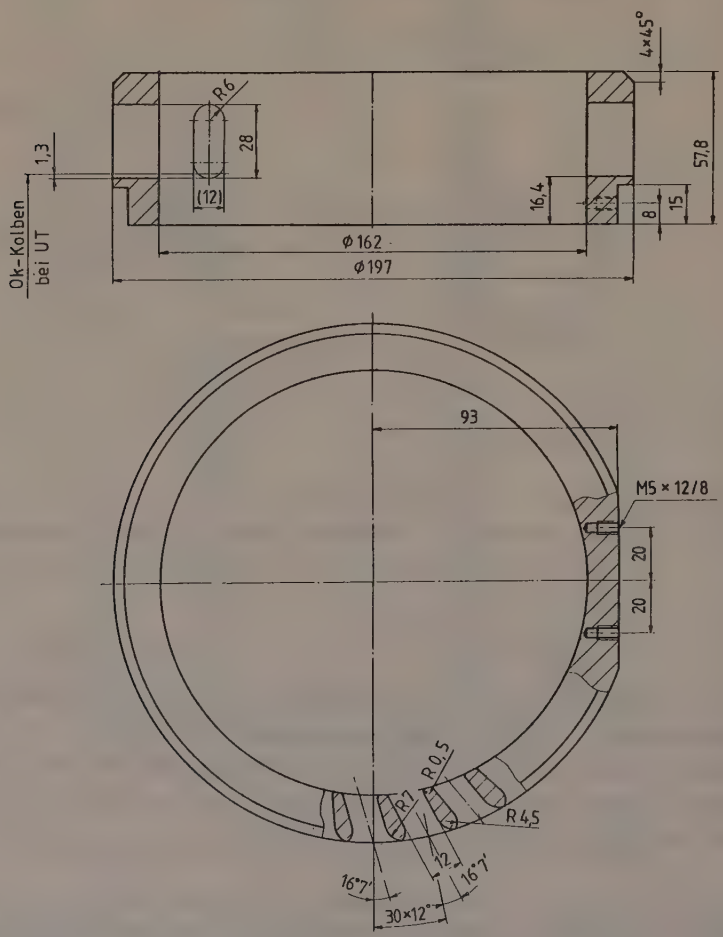


Bild 43: Spülschlitzeinsatz mit Angabe der Schlitzanordnung und der Schlitzabmessungen

Einen Einstieg zur Interpretation der in Abschnitt 5.2 vorgestellten Meßergebnisse liefert Bild 44, das ein Weg-Zeit-Diagramm und ein Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm der Kolbenbewegung zeigt. Mit eingezeichnet sind die Öffnungs- und Schließzeiten der Spülschlitze und des zentralen Auslaßventils, um eine Deutung der Meßdaten zu erleichtern.

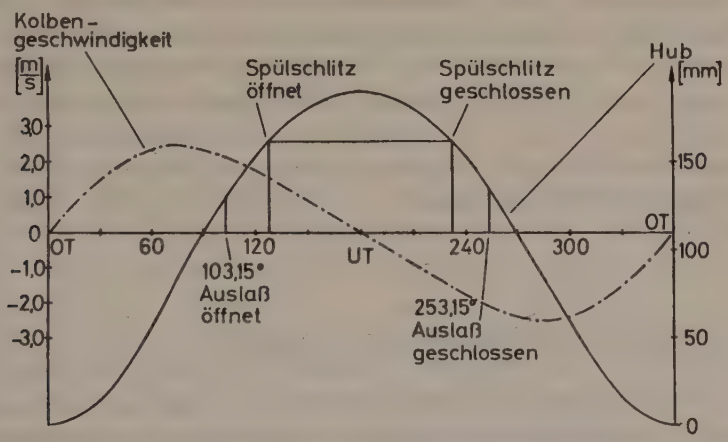


Bild 44: Kolbenauslenkung und Kolbengeschwindigkeit über dem Kurbelwinkel

Als verwendete Streuteilchen dienten etwa 1 µm große Silikonöltröpfchen, vgl. Abschnitt 3.3.3. Bei den geringen volumenbezogenen Teilchenkonzentrationen, wie sie für Laser-Doppler-Messungen benötigt werden, lagert sich während einer Messung das Öl in Form vieler Einzeltröpfchen auf der zur Zylinderinnenseite gekehrten Glasoberfläche ab, wodurch die Glasscheibe beschlägt. Durch leichtes Einölen dieser inneren Glasoberfläche entsteht ein dünner, optisch transparenter Ölfilm. Eine weitere Ablagerung von Streuteilchen während einer Messung führt nur zu einer Vergrößerung der Filmdicke, die optische Transparenz bleibt jedoch auf lange Zeit erhalten. Die optische Transparenz wird erst dann gestört, wenn bei senkrecht stehendem Fenster (z.B. Fenster 1) infolge einer zu großen Filmdicke eine "Nasenbildung" einsetzt und einzelne Tropfen nach unten laufen.

5. MESSERGEBNISSE

Analog zur getrennten Darstellung der beiden Motorenprüfstände mit Ottomotor und Dieselmotor erfolgt auch die Diskussion der erhaltenen Ergebnisse in zwei Unterkapiteln. Die Messungen im gefeuerten Ottomotor entstanden innerhalb des FVV-Projektes "Einlaßturbulenz" als gemeinsame Leistung des Instituts für Kolbenmaschinen von Prof. Jungbluth und des Lehrstuhls für Strömungsmechanik von Prof. Durst /66/. Die Messungen im geschleppten Modelldieselmotor entstanden als gemeinsame Leistung des Strömungslabors 1504 der Firma Gebr. SULZER in Winterthur (Schweiz) unter der Leitung von Herrn Durrer und dem Lehrstuhl für Strömungsmechanik in Erlangen.

5.1 Meßergebnisse im gefeuerten Ottomotor

Die ottomotorischen Untersuchungen zielten auf den Nachweis der Funktionstüchtigkeit der vom Autor entwickelten Meßeinrichtung ab, wobei als Forderungen der gefeuerte Motorbetrieb und das Erreichen einer hohen zeitlichen Auflösung, bzw. einer hohen Datenrate im Vordergrund standen. Die in Abschnitt 3.3.3 erwähnte Problematik der Streuteilchenaufbereitung und -zugabe stellte neben der generellen Reduzierung der Signalqualität, wie sie bei Messungen in Flammen oft beobachtet wird, große Anforderungen an die Qualität der optischen Einstellung der Motorensonde. Hohe Datenraten konnten außerdem nur bei sauberen Glasfenstern und einer genügend hohen Partikelkonzentration, vgl. Gleichung (33), erreicht werden. Aufgrund einer notwendigen, möglichst trägerluftarmen Teilchenzugabe, die stromab nach der Verdampfungsanlage erfolgen mußte, wurde die in Bild 34 schematisch gezeigte Stopfzylinder-Teilchenzugabe angewandt. Die Meßachse A-A mit Angabe der Meßpositionen sowie der nach oben zeigenden, positiven Geschwindigkeitsrichtung der vertikalen Komponente ist bereits in Bild 36 vorgestellt worden.

Drei Meßreihen mit jeweils zehn verschiedenen Meßorten zwischen den Positionen 37 mm und 56 mm, vgl. Bild 36, wurden unter Berücksichtigung von /67/ gefahren. Zwei dieser Meßreihen wurden bei 1300 1/min erhalten: eine Meßreihe der horizontalen Geschwindigkeitskomponente V und eine Meßreihe der vertikalen Geschwindigkeitskomponente U. Die dritte Meßreihe bei einer Drehzahl von 2000 1/min erfaßte die vertikale Komponente. Bei allen durchgeführten Messungen war die Drosselklappe voll geöffnet, d.h. der Motor lief immer unter Vollast. Dabei betrug das abgegebene Drehmoment 5 Nm bei 1300 1/min bzw. 9.5 Nm bei 2000 1/min.

Datenraten im Bereich von 4 kHz bis 100 kHz gewährleisteten eine ausreichende zeitliche Auflösung und Unterscheidung einzelner Motorzyklen. Diese hohen Datenraten ließen sich nur mit der schon erwähnten drucklos arbeitenden Stopfzylinder-Teilchenzugabe erreichen.

Die Verarbeitungselektronik erfaßte eine Vielzahl von Daten, deren Auswertung nach Abschluß der Messungen erfolgte. Die hier wiedergegebenen Ergebnisse sollen beispielhaft die Funktionstüchtigkeit des erstellten Laser-Doppler-Systems nachweisen und seine Leistungsfähigkeit für umfassende Messungen aufzeigen; parameterabhängige Deutungen von Detailproblemen erfordern zusätzliche Messungen, die nicht Bestandteil der hier beschriebenen Arbeiten waren.

Die Darstellung der Daten erfolgt in den nachfolgenden Abbildungen in graphischer Form, wobei zwei verschiedene Diagrammarten Anwendung finden, die Darstellung des zeitlichen Verlaufes einer Geschwindigkeitskomponente innerhalb eines einzelnen Motorzyklus und die Darstellung des über viele Motorzyklen gemessenen kurbelwinkelzugeordneten Mittelwertes einer Geschwindigkeitskomponente. Neben dem Mittelwert der ortsfest gemessenen Geschwindigkeit über dem Kurbelwinkel wird auch die Schwankungsgeschwindigkeit um diesen Mittelwert kurbelwinkelzugeordnet angegeben, sowie die An-

zahl der Messungen, über die innerhalb des betrachteten 1° KW breiten Fenster gemittelt wurde. Das Auswerteprogramm ist somit in der Lage, kontinuierlich erhaltene Geschwindigkeitsinformationen in verschiedenen Formen darzustellen.

Bild 45 zeigt die Auftragung der Geschwindigkeitsmeßwerte der vertikalen Komponente U am Meßort 41 mm in Form einzelner Geschwindigkeitsmessungen, die jeweils den lokalen Momentangeschwindigkeiten von Streuteilchen entsprechen. Alle 2311 Meßwerte wurden innerhalb eines Viertakt-Zyklus von 0° KW bis 720° KW bei einer Motordrehzahl von 1300 1/min erhalten. Berücksichtigt man, daß in den Kurbelwinkelbereichen von etwa 690° KW bis 30° KW, sowie von etwa 330° KW bis 390° KW aufgrund der in Abschnitt 4.1 beschriebenen und in Bild 36 gezeigten Glasfenstereinbausituation - infolge der Ausblendung des Meßvolumens durch den Kolben - keine Laser-Doppler-Signale empfangen werden können, so reduziert sich das erfaßbare Kurbelwinkelfenster von 720° KW auf etwa 600° KW. Somit konnte im Mittel bei diesem Zyklus etwa viermal pro ° KW gemessen werden. Die mittlere Datenrate gültiger Messungen betrug in diesem Meßpunkt etwa 30 kHz. Bild 46 zeigt den identischen Motorzyklus, wie er in Bild 45 abgebildet ist, in einer anderen Darstellungsform, bei der die Einzelmeßpunkte durch Geraden verknüpft sind.

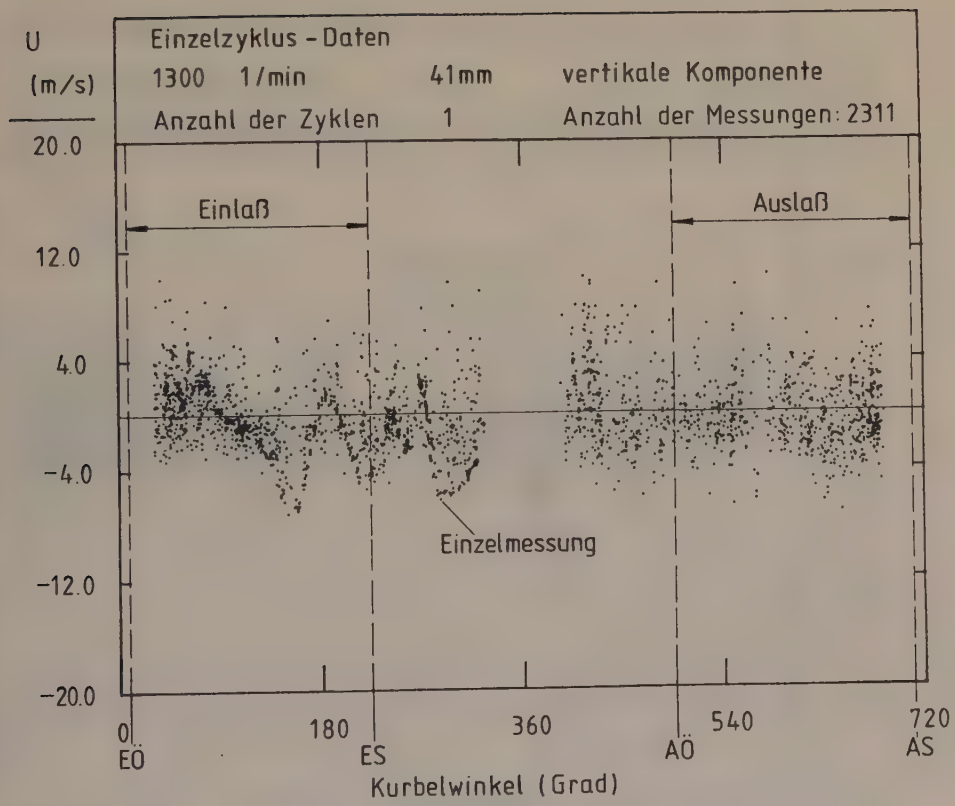


Bild 45: Scatterdiagramm der vertikalen Komponente bei Position 41 mm und 1300 1/min (gefeuerter Ottomotor)

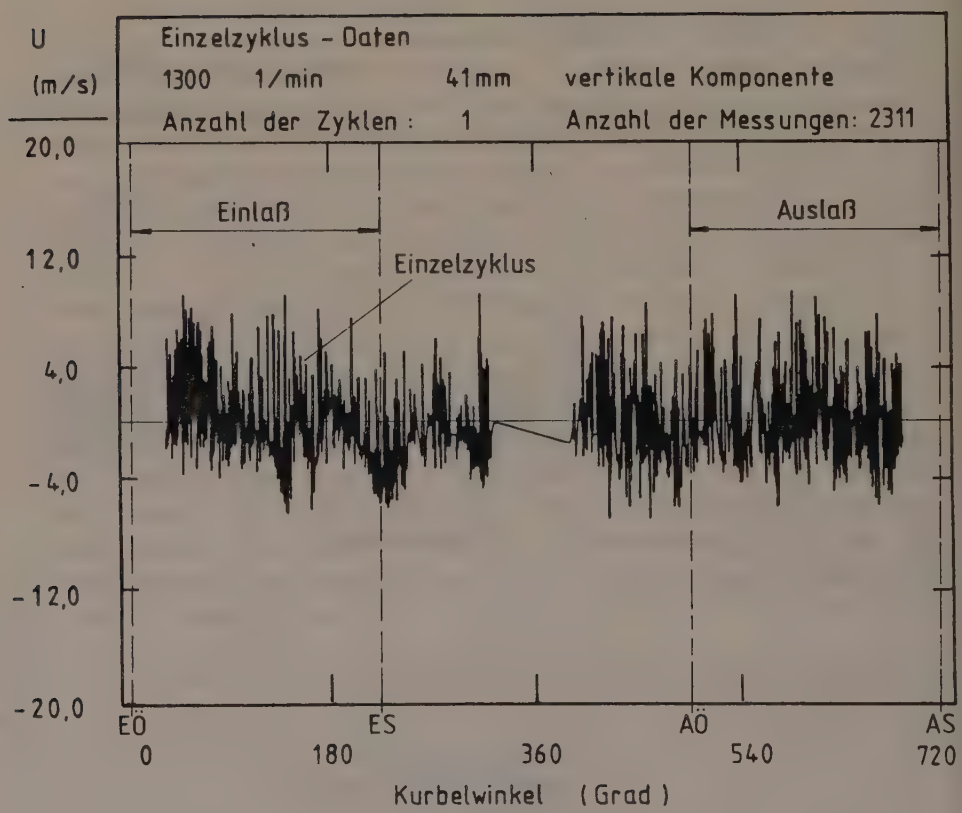


Bild 46: Darstellung eines Einzelzyklus der vertikalen Komponente bei Position 41 mm und 1300 1/min (gefeuerter Ottomotor)

Desweiteren erlaubt die Einzelzyklus-Darstellung, vier aufeinanderfolgende Zyklen in einem gemeinsamen Diagramm anzuordnen, um auf diese Weise einen Überblick über zyklische Schwankungen zu gewinnen. Bild 47 zeigt ein Beispiel eines solchen Diagramms. Aufgetragen ist wiederum die vertikale Komponente U der Geschwindigkeitsmeßwerte am Meßort 41 mm, vgl. Bild 36. Die Anzahl der gültigen Messungen, die innerhalb der vier Motorzyklen erfaßt werden konnte, beträgt 9095. In dem Zeitabschnitt, in dem der Kolben das Meßvolumen passiert, erfolgten jeweils keine Laser-Doppler-Messungen. Die Elektronik erkannte dies richtig und hielt es fest.

Bei den über viele Einzelzyklen gemittelten Messungen kann zur Darstellung eine Auftragung gemäß Bild 48 gewählt werden. Meßort, Motordrehzahl und gemessene Komponente sind die gleichen wie in den Bildern 45, 46 und 47. Die Anzahl der gültigen Messungen für die Mittelwertbildung betrug jeweils 49500, wofür 24 Viertaktzyklen, also 48 Motorumdrehungen notwendig waren. Der kurbelwinkelzugeordnete Geschwindigkeitsmittelwert der über 24 Zyklen gemittelt ist, zeigt einen im Vergleich zum Einzelzyklus in Bild 46 schon wesentlich geglätteten Verlauf. Der RMS-Wert bleibt nahezu konstant über dem Kurbelwinkel. Die von der Oberkante des Diagramms nach unten aufgetragene Anzahl der Messungen pro Kurbelwinkelfenster von 1° KW zeigt ein über dem Einlaßtakt abklingendes Maximum, das vermutlich mit dem Meßort zusammenhängt, der bei Position 41 mm unterhalb des Einlaßventils liegt, vgl. Bild 36.

Diese Messung zeigt, daß die zu Beginn des Einlaßvorganges im Mittel über viele Zyklen gemessene Turbulenz nicht nur bis zum Zeitpunkt der Zündung, sondern darüber hinaus über das volle Arbeitsspiel nahezu erhalten blieb. Die Kombination der Einzelzyklusinformationen von Bild 45 mit den Mittelwerten von Bild 48 liefert eine Diagrammform, die nach Ansicht des Autors besonders geeignet ist, zu demonstrieren, wie stark sich ein einzelner Motorzyklus vom statistisch gemittelten Verlauf über viele Zyklen unterscheiden kann, siehe Bild 49.

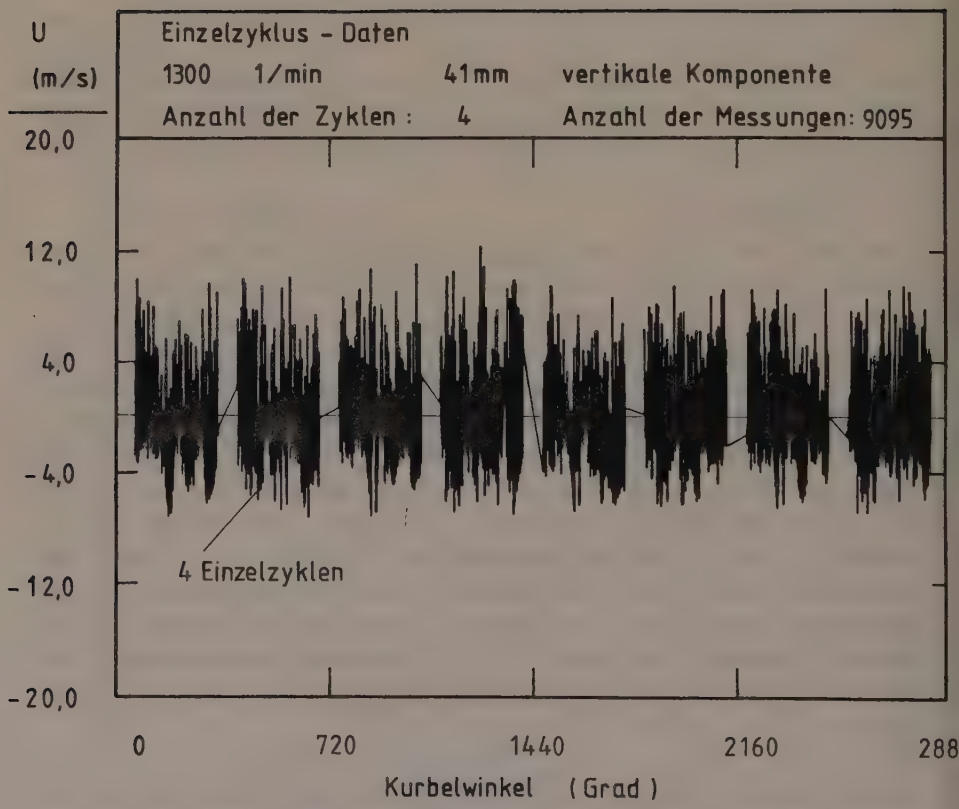


Bild 47: Darstellung vier aufeinanderfolgender Einzelzyklen der vertikalen Komponente bei Position 41 mm und 1300 1/min (gefeuerter Ottomotor)

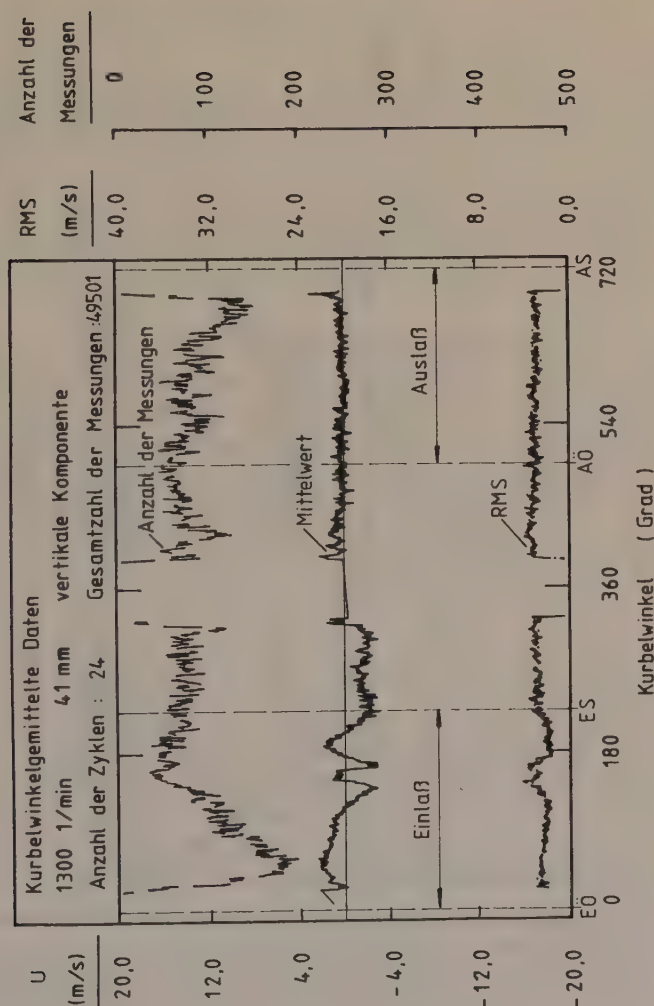


Bild 48: Mittelwert der Einzelzyklen der vertikalen Komponente bei Position 41 mm und 1300 1/min (gefeuerter Ottomotor)

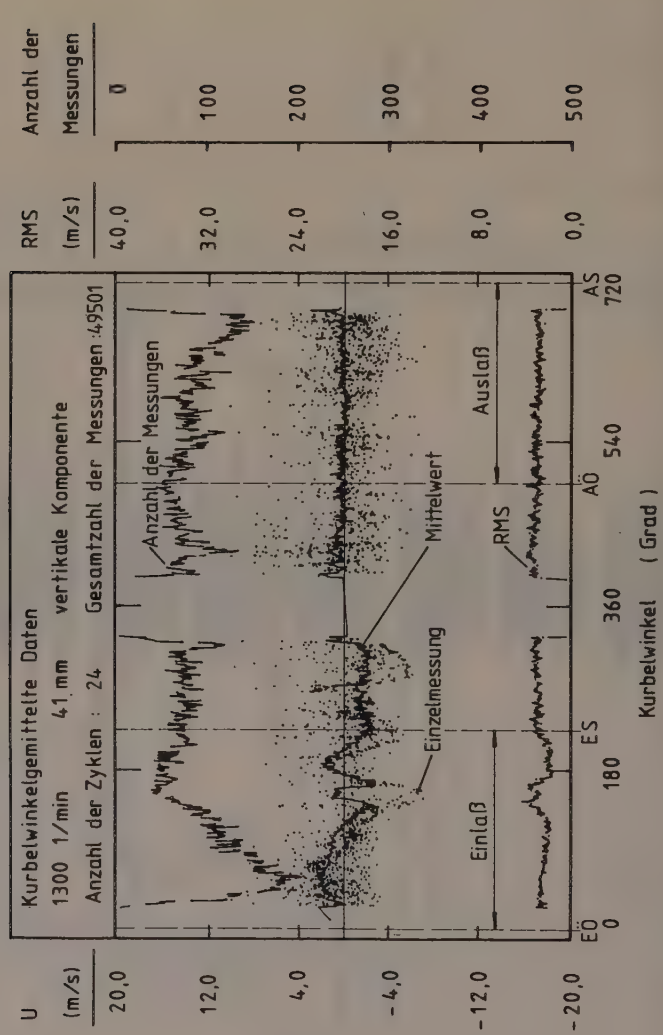


Bild 49: Kombiniertes Diagramm mit dem Mittelwert der Einzelzyklen und Einzelmeßpunkten der vertikalen Komponente bei Position 41 und 1300 1/min (gefeuerter Ottomotor)

5.2 Meßergebnisse im geschleppten Dieselmotor

Die Messungen im geschleppten Modell-Dieselmotor hatten das Ziel, die Anwendbarkeit der Laser-Doppler-Sondentechnik bei geschlepptem Modell-Dieselmotor nachzuweisen. Erst wenn Messungen im geschleppten Motor problemlos erhalten werden - so war die Vorgabe - kann eine spätere Anwendung der Laser-Doppler-Sondenmeßtechnik auf einen gefeuerten Schiffsdieselmotor befürwortet werden.

In dem in Bild 40 schematisch gezeigten Modell-Dieselmotor wurden zwei verschiedene Meßreihen mit dem zweikanaligen Sonden-Laser-Doppler-Anemometer durchgeführt, eine Meßreihe durch Fenster 1 und eine weitere Meßreihe durch Fenster 4. Bei Fenster 1 wurden 26 verschiedene Meßpunkte zwischen der Position 39 mm und der Position 169 mm erhalten, wobei die positive Richtung der vertikalen $U_{(1)}$-Komponente nach oben zeigt und die positive Komponente $V_{(1)}$-Komponente in die Papierebene hinein gerichtet ist, vgl. Bild 41.

Bild 50 zeigt den über viele Motorzyklen gemittelten zeitlichen Geschwindigkeitsverlauf der horizontalen $V_{(1)}$-Komponente an der Position 49 mm. Die Anzahl der gültigen Meßwerte beträgt 49500. Die $V_{(1)}$-Komponente (Drallkomponente) zeigt an dieser Stelle einen nahezu gleichförmigen negativen Wert von etwa - 1.6 m/s. Dies läßt eine ausgeprägte, rechtsgerichtete Drallbewegung vermuten, die während des kompletten Zweitaktzyklus erhalten bleibt. Der RMS-Wert besitzt einen ebenfalls fast gleichförmigen Verlauf von etwa 0.5 m/s. Diesem konstanten Wert ist ein scheinbar genau mit der Kolbengeschwindigkeit synchroniserter, in erster Näherung sinusförmiger Anteil von maximal $\pm$ 0.3 m/s überlagert. Die Anzahl der Meßwerte ist in der zweiten Zyklushälfte zwischen 180° KW und 360° KW, also in der zweiten Hälfte der Spülphase und in der Kompressionsphase, etwa doppelt so hoch wie in der ersten Zyklushälfte des Zweitaktmotors. Die erste Zyklushälfte zwischen 0° KW und 180° KW umfaßt die Expansionsphase sowie die erste Hälfte der Spülphase.

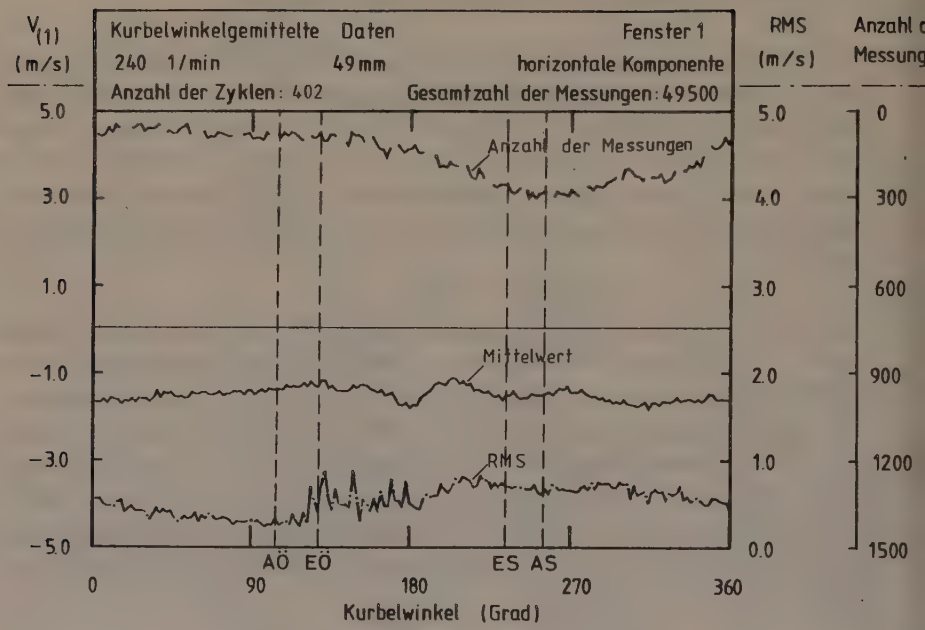


Bild 50: Mittelwert der Einzelzyklen der horizontalen $V_{(1)}$-Komponente (Drallkomponente) bei Position 49 mm und 240 1/min (geschleppter Dieselmotor)

Bild 51 zeigt die simultan zur bereits besprochenen $V_{(1)}$-Komponente gemessene, vertikale $U_{(1)}$-Komponente an der gleichen Meßposition (49 mm). Die Anzahl der gültigen Meßwerte beträgt wiederum 49500. Die $U_{(1)}$-Komponente (Axialkomponente) wird in ihrem zeitlichen Verlauf stark von dem Spülvorgang beeinflußt. Es ist jedoch auch zu erkennen, daß die Spülströmung eine lange Anlaufzeit zur Beschleunigung benötigt, ehe sie ihren Maximalwert erreicht. Die in Bild 51 mit eingezeichneten Steuerzeiten helfen bei der Deutung des Spülvorganges. Im restlichen Kurbelwinkelbe-

reich folgt das Gas mit seiner axialen Ausbreitungsgeschwindigkeitskomponente $U_{(1)}$ der Bewegungsrichtung des Kolbens. Der RMS-Verlauf der vertikalen Komponente über dem Kurbelwinkel gleicht in der ersten und zu Beginn der zweiten Zyklushälfte dem RMS-Verlauf, wie er bei der horizontalen Komponente gemessen wurde, vgl. Bild 50. Etwa ab Ende des Spülvorganges und in der Kompressionsphase liegen die Schwankungsgeschwindigkeiten der vertikalen Komponente deutlich über den Schwankungsgeschwindigkeiten der horizontalen Komponente. Die Anzahl der Messungen der vertikalen Komponente über dem Kurbelwinkel entspricht wegen der in Abschnitt 3.3.2.2 erläuterten simultanen Erfassung der beiden Meßkanäle notwendigerweise genau dem Verlauf der Anzahl der Messungen der horizontalen Komponente.

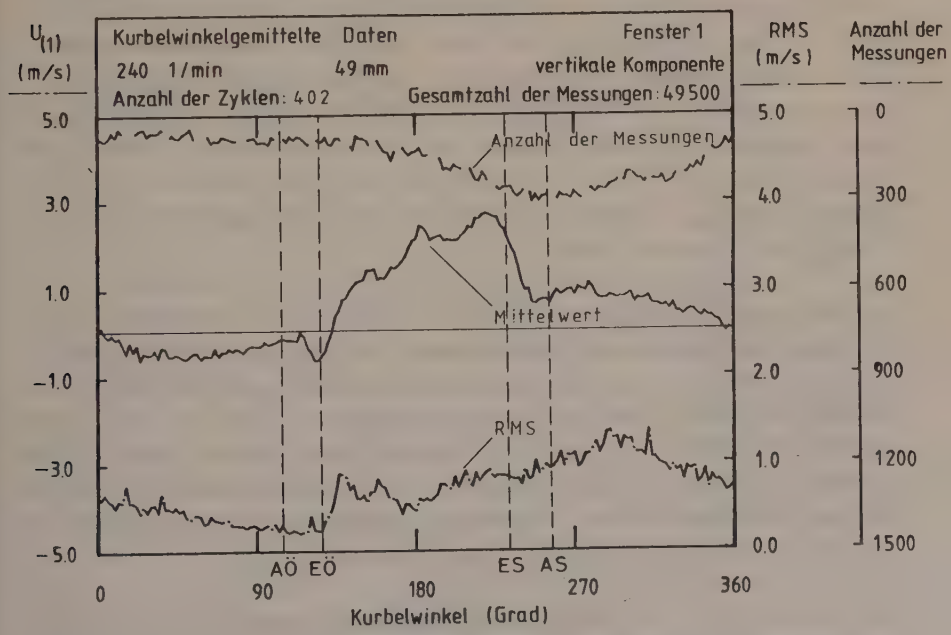


Bild 51: Mittelwert der Einzelzyklen der vertikalen $U_{(1)}$-Komponente (Axialkomponente) bei Position 49 mm und 240 1/min (geschleppter Modell-Dieselmotor)

Durch Mittelung der zeitaufgelösten Meßwerte zwischen 355° KW und 358° KW an einem Meßort kann für jeden der 26 Meßorte jeweils ein Meßwertepaar für die mittlere Geschwindigkeit und die Schwankungsgeschwindigkeit angegeben werden. Dieses Meßwertepaar bei OT-Stellung des Kolbens kann über der betreffenden Meßposition aufgetragen werden. Bei Berücksichtigung aller Meßpositionen entsteht ein räumliches Geschwindigkeitsprofil bei OT. Bild 52 zeigt in der oberen Bildhälfte die um OT gemittelten Meßwerte für die mittlere Geschwindigkeit und die Schwankungsgeschwindigkeit der horizontalen $V_{(1)}$-Komponente aufgetragen über dem Zylinderdurchmesser. Hierbei wurden die gemessenen Geschwindigkeiten durch die mittlere Kolbengeschwindigkeit dividiert, um eine dimensionslose Darstellung der Meßdaten zu erreichen. Das Profil der mittleren Geschwindigkeit offenbart eine ausgeprägte Drallbewegung im OT-nahen Kurbelwinkelbereich, die den Bohrungsdurchmesser des Zylinders fast vollständig umfaßt. Drei Meßpunkte liegen etwas abseits des Drallprofils, davon konnte einer mittels Nachmessung korrigiert werden. Das Profil der Schwankungsgeschwindigkeit weicht bei diesen Meßorten von seiner im restlichen Verlauf nahezu ausgeglichenen und konstanten Profilform ab. Dies bestätigt die Vermutung, daß es sich bei den drei abseitsliegenden Punkten um "Ausreißer" handeln muß.

In der unteren Hälfte von Bild 52 sind die entsprechenden Profile für die vertikale $U_{(1)}$-Komponente aufgetragen. Das RMS-Profil verläuft wieder auf nahezu konstantem Wert. Dieser Verlauf des RMS-Wertes über dem Zylinderdurchmesser stimmt mit den in der oberen Bildhälfte gezeigten RMS-Profilen nahezu überein. Das Profil der mittleren Geschwindigkeit verläuft nahe bei der Geschwindigkeitsnullinie, verbleibt jedoch im größten Teil des Zylinderdurchmessern im positiven Bereich.

Die Genauigkeit der über 4° KW gemittelten Meßwerte der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der dazugehörigen Schwankungsgeschwindigkeit kann über die Anzahl der für die Mittelung verwendeten Meßpunkte abgeschätzt werden /68/.

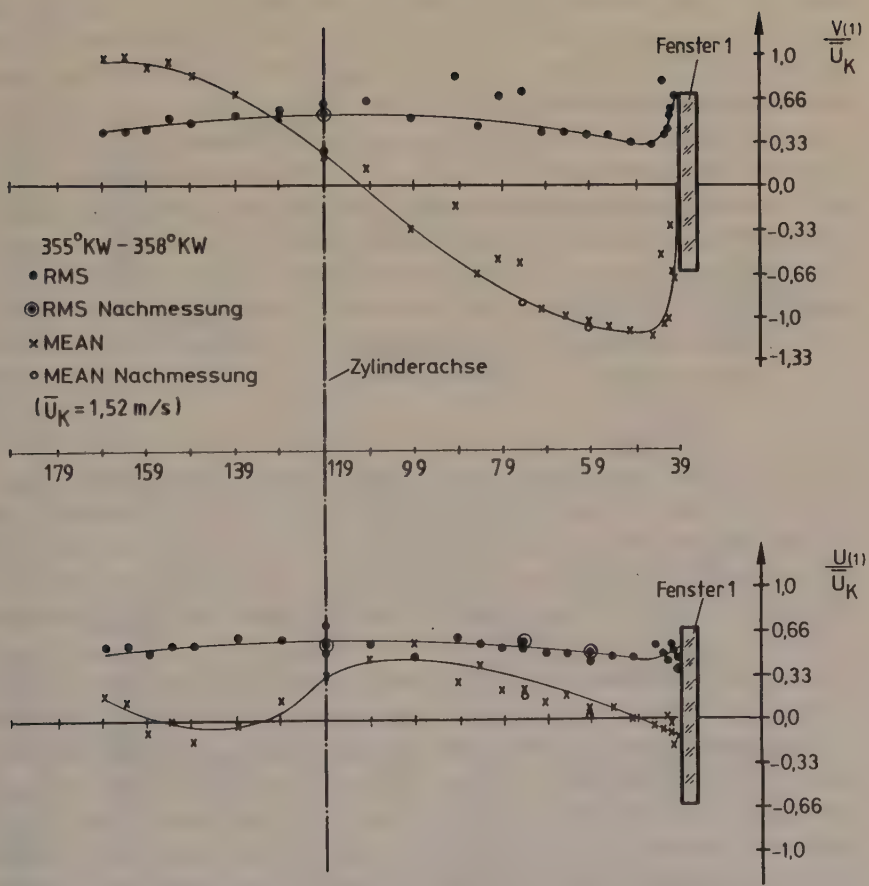


Bild 52: Räumliche Geschwindigkeitsprofile gemittelt von 355° KW bis 358° KW über dem Zylinderdurchmesser (Fenster 1)

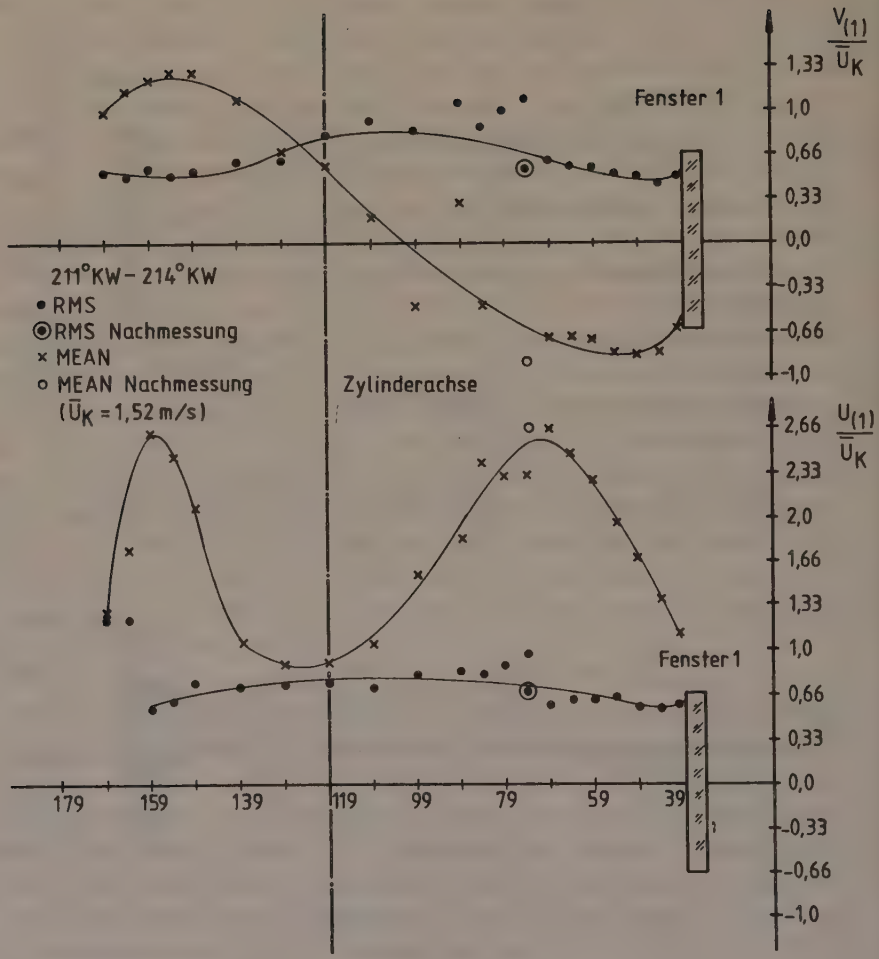


Bild 53: Räumliche Geschwindigkeitsprofile gemittelt von 211° KW bis 214° KW über dem Zylinderdurchmesser (Fenster 1)

Ein weiteres, durch Meßfenster 1 erhaltenes, räumliches Profil ist in Bild 53 gezeigt. Das Mittelungsintervall reicht hier von 211° KW bis 214° KW und liegt somit kurz vor Ende der Spülphase. Das in der oberen Bildhälfte angegebene $V_{(1)}$-Profil der mittleren Strömungsgeschwindigkeit zeigt ein ausgeprägtes Drallprofil, das sich von dem bei OT erhaltenen Profil von Bild 52 kaum unterscheidet. Das gleiche gilt auch für die Schwankungsgeschwindigkeit $V_{(1)}$-Komponente. Die axiale $U_{(1)}$-Komponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit zeigt die Auslaßströmung, wobei unter dem Ventil ein deutlicher Profileinbruch zu erkennen ist. Der RMS-Verlauf der $U_{(1)}$-Komponente zeigt keine Besonderheiten. Ein Vergleich der Bilder 52 und 53 offenbart, daß die gleichen Meßpunkte, die in Bild 52 schon aus "Ausreißer" bezeichnet wurden, in Bild 53 wiederum von der übrigen gemessenen Profilform stark abweichen.

Die zweite Meßreihe wurde durch das im Kolben befindliche Fenster 4 des geschleppten Modell-Dieselmotors erhalten. Die Einbaulage des Fensters 4 ist in den Bildern 40, 41 und 42 gezeigt, wobei Bild 41 geeignet ist, den minimal möglichen Zylinderabstand von 8 mm zu erklären. In Bild 43 waren die Spülschlitzabmessungen sowie die Lage der Spülschlitze innerhalb des speziellen Einsatzringes angegeben. Bild 54 zeigt in vergrößerter Form die Kanalform eines Spülschlitzes. In der oberen Bildhälfte sind die gewählten, rasterartig angeordneten, einzelnen Meßorte in 4 mm bzw. 5 mm Teilung ab der Oberkante des Kolbenbodens in der UT-Lage angegeben. Die durch Unterstreichen gekennzeichnete Ebene H = 15 mm stellt die Meßachse dar, für die die in der unteren Bildhälfte angegebenen zweikomponentigen Geschwindigkeitsvektoren gemessen wurden. Das für die Mittelung benutzte Kurbelwinkelfenster lag zwischen 180° KW und 183° KW, also bei der UT-Kolbenposition.

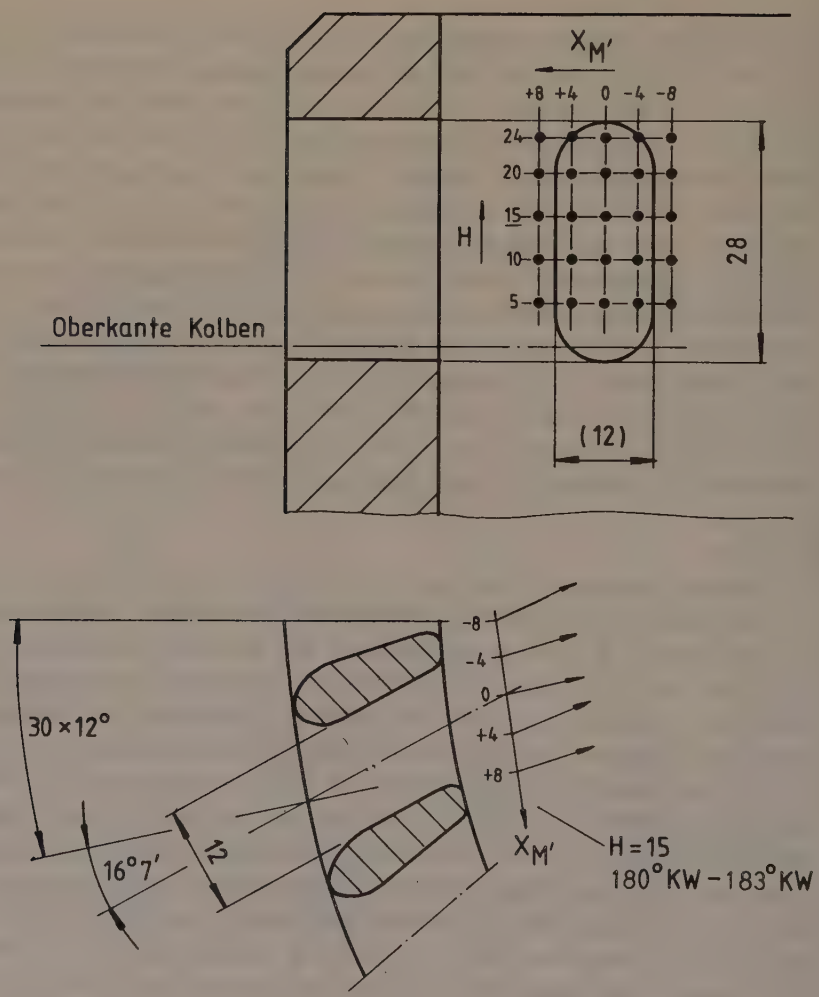


Bild 54: Definition der Meßpunktpositionen bei den Messungen durch Fenster 4 sowie räumliche Geschwindigkeitsvektoren bei H = 15 mm am Spülschlitzaustritt (Kurbelwinkelfenster von 180° KW bis 183° KW)

Die über der Spülschlitzbreite aufgetragenen Meßprofile, aus denen die in Bild 53 gezeigten Geschwindigkeitsvektoren der Ebene H = 15 mm hervorgingen, sind in Bild 55 für die radiale $U_{(4)}$-Komponente und die horizontale $V_{(4)}$-Komponente gezeigt.

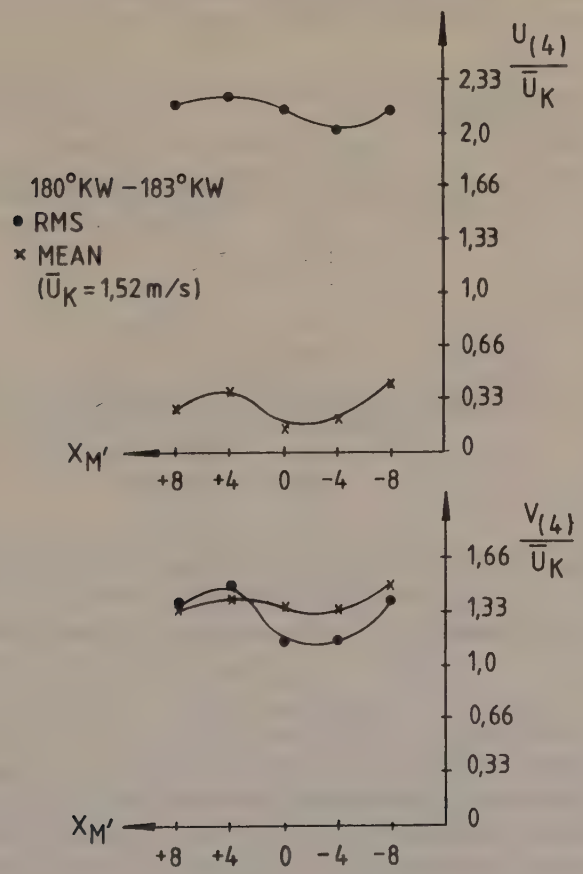


Bild 55: Geschwindigkeitsprofile der radialen und der horizontalen Geschwindigkeitskomponente (gemittelt von 180° KW bis 183° KW) über dem Spülschlitzquerschnitt in der Höhe H = 15 mm (Fenster 4)

Das Beispiel einer simultanen, zweikomponentigen, zeitaufgelösten Geschwindigkeitsmessung am Spülschlitzausgang wird in Bild 56 für die radiale und in Bild 57 für die horizontale Geschwindigkeitskomponente aufgezeigt. Der Meßpunkt liegt auf der Höhe 15 mm an der zentral zum Schlitz gelegenen Position bei $x_{M'} = 0$. Die Anzahl der Meßwerte beträgt jeweils 49500.

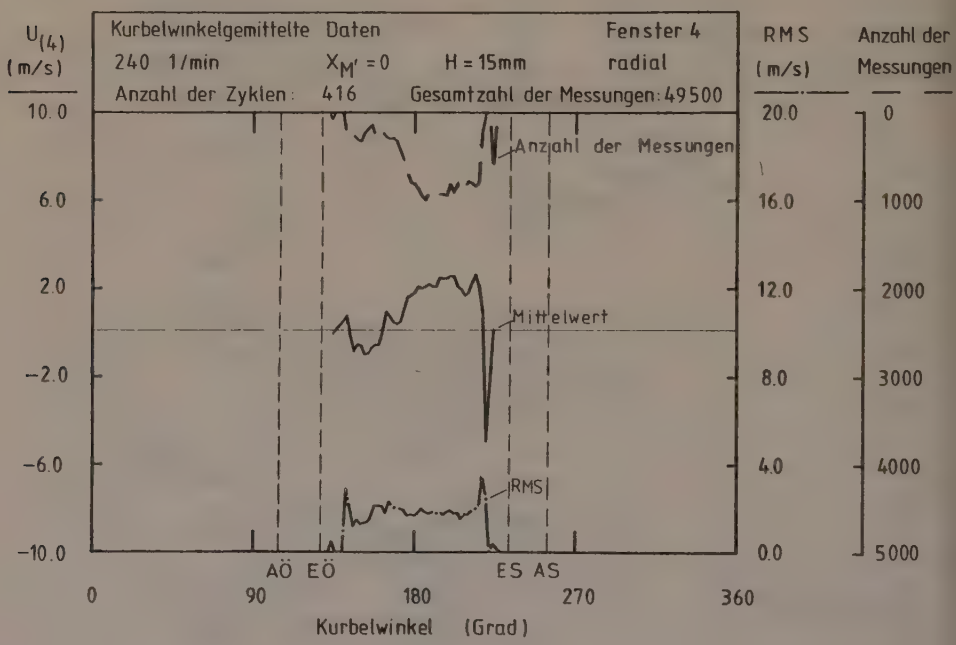


Bild 56: Mittelwert der Einzelzyklen der radialen $U_{(4)}$-Komponente bei Position $x_{M'} = 0$, H = 15 mm und 240 1/min (geschleppter Modell-Dieselmotor)

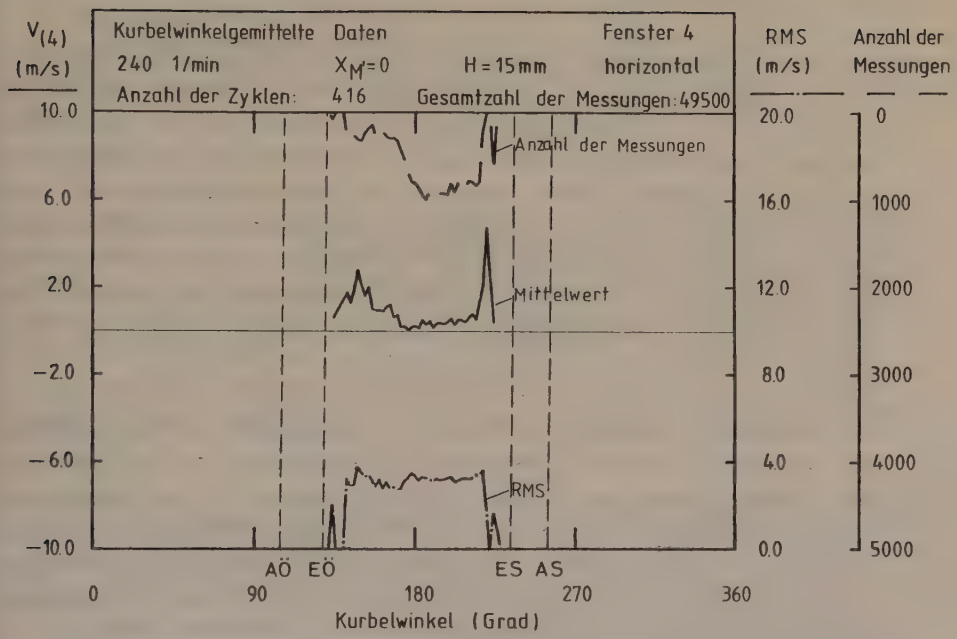


Bild 57: Mittelwert der Einzelzyklen der horizontalen $V_{(4)}$-Komponente (Drallkomponente) bei Position $x_{M'} = 0$, $H = 15$ mm und 240 1/min (geschleppter Modell-Dieselmotor)

Die Bilder 56 und 57 zeigen eine über dem Kurbelwinkel aufgetragene Zweikomponenten-Geschwindigkeitsmessung vor dem Spülschlitzquerschnitt. Wie aus den dargestellten Meßwertverläufen hervorgeht, konnten auswertbare Signale nur bei offenen Einlaßschlitzen erhalten werden, wobei die radiale Komponente etwa gegenphasig zur tangentialen Komponente verläuft. Die RMS-Verläufe sind beide gleichmäßig, unterscheiden sich aber betragsmäßig um etwa 50%, wobei die Drallkomponente gegenüber der Radialkomponente der Schwankungsgeschwindigkeit überwiegt.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit zeigt auf, daß Lichtwellenleiter herangezogen werden können, um Laser-Doppler-Miniatur-Sondenköpfe mit dem Laserlicht leistungsstarker Argon-Ionen-Laser zu versorgen. Infolge der kleinen Baugröße und des robusten Aufbaus können die entwickelten Sonden unter industriellen Umgebungsbedingungen Einsatz finden. Durch die geringen Sondenabmessungen vereinfachen sich auch notwendige Traversiervorrichtungen sehr stark. Die mit den entwickelten Sonden erreichte Signalqualität kann von der konventioneller Laser-Doppler-Anemometer kaum unterschieden werden.

Der praktische Einsatz der Sonden für Messungen in einem gefeuerten Ottomotor und einem geschleppten Dieselmotor ist beschrieben. Bei diesen Messungen finden Laser, Großteile des optischen Systems und die Photodetektoren außerhalb der Motorenprüfstandszelle bzw. auf einem schwingungsgedämpften optischen Tisch Platz, wo sich thermische und mechanische Störungen nur noch in geringem Maße schädlich auswirken können.

Die verwendete Signalauswertung basiert auf einem ein- bzw. zweikanaligen kommerziellen Laser-Doppler-Countersystem, das durch seine hardwaremäßige Frequenzbestimmung in Verbindung mit einer schnellen Datenübertragung zum Computer sowohl kurbelwinkelaufgelöste Einzelzyklusmessungen als auch kurbelwinkelangeordnete, über viele Zyklen gemittelte Geschwindigkeitsmessungen erlaubt, wie sie für Untersuchungen des Strömungsfeldes in Motoren benötigt werden. Die Auswerteprogramme ermöglichen eine anschauliche Aufbereitung der Momentanmessungen zu Einzelzyklusdaten und zyklusgemittelten Daten. Drei Meßreihen wurden im gefeuerten Ottomotor durchgeführt. Die erreichte Datenrate war dabei so hoch, daß die Geschwindigkeit im Mittel mit einer Auflösung von einem Grad Kurbelwinkel erfaßt wurde. Die erhaltenen Messungen demonstrieren, daß zeitaufgelöste und zeitgemittelte Geschwindigkeitsmessungen einzelner oder mehrerer Motorzyklen mit Gradien-

tenfaser-Laser-Doppler-Anemometern im gefeuerten Ottomotorbetrieb im Rückstreuverfahren möglich sind. Es zeigte sich ferner aus den ottomotorischen Untersuchungen, daß die Einlaßturbulenz im gefeuerten Betrieb über den Einlaßtakt hinaus auch im Kompressionstakt noch erhalten bleibt, wodurch sie die Verbrennung beeinflussen kann.

Zwei Sätze simultaner Zweikanalgeschwindigkeitsmessungen wurden im geschleppten Zweitakt-Modell-Dieselmotor erhalten. Diese Messungen offenbaren einen charakteristischen von der Spülströmung angeregten Einlaßwirbel, der das Altgas zum zentralen Auslaßventil hinausschiebt. Die Axialkomponente steht unter dem Einfluß des Spülvorgangs, bei geöffnetem Auslaßventil und öffnenden Spülschlitzen steigt die Axialkomponente der Geschwindigkeit stark an.

Bei der bewiesenen Signalqualität im gefeuerten Ottomotor wie im geschleppten Dieselmotor bietet sich die Fasermeßtechnik bei geeigneter Teilchenzugabe in Zukunft auch für den gefeuerten Zweitakt-Großdieselmotor an, wo Messungen die notwendigen Randbedingungen für Strömungsberechnungen liefern sollen. Hier scheint insbesondere der Spülvorgang verbesserungsfähig zu sein. Durch ein möglichst ebenes Geschwindigkeitsprofil über dem Zylinderdurchmesser könnte ein besserer Luftreinheitsgrad beim Spülen erreicht werden. Eine Verbesserung des Füllungsgrades, sowie eine Verringerung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs wären damit erreichbar. Bei den Ottomotoruntersuchungen sollen ausgedehnte Messungen der zeitaufgelösten Geschwindigkeitsprofile über dem Zylinderquerschnitt einen tieferen Einblick in den Einfluß ausgewählter Motorparameter auf das Strömungsfeld in OT-Stellung des Kolbens in Zündkerzennähe zum Zündzeitpunkt erlauben. Auf diese Weise kann vielleicht auch etwas mehr Licht in die Ursache der zyklischen Schwankungen im Verbrennungsablauf gebracht werden, deren zuverlässige Eliminierung bei magerem Motorbetrieb noch immer das Hauptproblem der Ottomotorenentwickler darstellt.

Bei solchen Untersuchungen, wie auch in vielen anderen technisch relevanten Strömungen, werden künftig verstärkt Glasfaseroptiken für anstehende Geschwindigkeitsprobleme eingesetzt werden, da sie in der Praxis große Vorteile in der Handhabung aufweisen.

LITERATUR

/1/ Clerk, D.: "Cylinder actions in gas and gasoline engines", SAE Journal, Vol. 8, (1921), pp. 523-586.

/2/ Ricardo, H.R.: "Recent research work on internal combustion engine", Transaction SAE, Vol. 17, (1922).

/3/ Alcock, J.F.: "Air swirl in oil engines", Proc. I. Mech. E., Vol. 128, (1934), pp. 123-193.

/4/ Semenov, E.S.: "Studies of turbulent gas flow in piston engines", Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk, No. 8, (1958), NASA Technische Übersetzung F-97, (1963).

/5/ Witze, P.O.: "A critical comparison of hot-wire anemometry and laser Doppler velocimetry for I.C. engine applications", SAE Paper 800132, (1980).

/6/ Amann, C.A.: "Classical Combustion Diagnostics for Engine Research", SAE Paper 850395, (1985).

/7/ Yeh, Y., Cummins, H.Z.: "Localized flow measurements with a He-Ne laser spectrometer", Appl. Phys. Letters, Vol. 4, (1964), pp. 176-178.

/8/ Durst, F.: "Development and Application of Optical Anemometers", Ph.D.-Thesis, University of London, (1972).

/9/ Trolinger, J.D., Bentley, H.T., Lennert, A.E. and Sowls, R.E.: "Application of electro-optical techniques in Diesel engine research", SAE Trans., Paper 740125, (1974).

/10/ Melling, A. and Whitelaw, J.H.: "Design of laser-Doppler-anemometers for reciprocating engines", Imperial College, Mech. Eng. Dept., Report CHT/76/6, (1976).

/11/ Hutchinson, P., Morse, A. and Whitelaw, J.H.: "Velocity measurements in motored engines for engine research", AERE Harwell-Report, AERE-R 8922, (1978).

/12/ Vafidis, C.: "Aerodynamics of Reciprocating Engines", Ph.D.-Thesis, University of London, (1985).

/13/ Bopp, S., Vafidis, C. and Whitelaw, J.H.: "The Effect of Engine Speed on the TDC Flowfield in a Motored Reciprocating Engine", SAE Paper 860023, (1986).

/14/ Gosmann, A.D.: "Multidimensional modelling of cold flows and turbulence in reciprocating engines", SAE Paper 850344, (1985).

/15/ Arcoumanis, C. and Whitelaw, J.H.: "Fluid mechanics of internal combustion engines: A review", Proc. Symposium on Flows in Reciprocating Engines, ASME Winter Meeting, Miami Beach, Florida, (1985).

/16/ Cole, J.B. and Swords, M.D.: "Optical studies of turbulence in an internal combustion engines", Seventeenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, (1985), p. 1295.

/17/ Cole, J.B. and Swords, M.D.: "An investigation of the ignition process in a lean burning engine using conditionally sampled laser-Doppler anemometry", SAE Paper 800043, (1980).

/18/ Cole, J.B. and Swords, M.D.: "On the correlation between gas velocity and combustion pressure fluctuations in a spark-ignition engine", Eighteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, (1981), pp. 1837-1845.

/19/ Dyer, T.M. and Witze, P.O.: "Laser velocimeter-measurements in a constant volume internal combustion engine simulator", Proc. 3rd Int. Laser-Velocimetry Workshop, Purdue University, (1978).

/20/ Witze, P.O. and Dyer, T.M.: "Laser measurement techniques applied to turbulent combustion in piston engines", ASME 105th Winter Annual Meeting, New Orleans, L.A., AMD, Vol. 66, (1984), pp. 141-158.

/21/ Witze, P.O., Martin, J.K. and Borgnakke, C.: "Measurements and predictions of the precombustion fluid motion and combustion rates in a spark ignition engine", SAE Paper 831697, (1983).

/22/ Witze, P.O., Martin, J.K. and Borgnakke, C.: "Conditionally-sampled velocity and turbulence measurements in a spark ignition engine", Comb. Sci. Tech., Vol. 36, (1984), pp. 301-317.

/23/ Witze, P.O. and Baritaud, T.A.: "Influence of Combustion on LDV Signal Quality in a Spark Ignation Engine", SANDIA-Report SAND 84-8964, (1985).

/24/ Dyer, T.M.: "New Experimental Techniques for In-Cylinder Engine Studies", SAE Paper 850396, (1985).

/25/ Abraham, J., Williams, F.A. and Bracco, F.V.: "A Discussion of Turbulent Flame Structure in Premixed Charges", SAE Paper 850345, (1985).

/26/ Rask, R.B.: "Laser Doppler anemometer measurements of mean velocity and turbulence in internal combustion engines", General Motors Report GMR-4839, (1984).

/27/ Fansler, T.D.: "Time-multiplexed photon-correlation velocimetry for unsteady flows: method and application to a reciprocating engine", Proc. of the 6th International Conference on Photon Correlation and Other Techniques in Fluid Mechanics, Cambridge, (1985), pp. 19-26.

/28/ Max, E. and Fernström, G.: "Turbulent Engine Flow Measurements Using LDA with Correlator", Kap. 13 in "Photon Correlation Techniques" von Schulz-Dubois, E.O., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Vol. 38, (1982), pp. 159-167.

/29/ Wigley, G. Patterson, A.C. Renshaw, J.: "Swirl Velocity Measurements In A Firing Production Diesel Engine By Laser-Anemometry", Fluid Mechanics of Combustion Systems, (1981), pp. 29-39.

/30/ Wigley, G. and Glanz, R.: "A Laser Anemometer System For Engine Flow Studies", Proc. of the Second International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lissabon, (1984), paper 9.3.

/31/ Hamamoto, Y., Tomita, E., Tanaka, Y. and Katayama, T.: "The Effect of Swirl on Spark-Ignition Engine Combustion", Diagnostics and modelling of combustion in reciprocating engines Symposium, Tokyo, Sept. 4.-6., (1985), pp. 413-422.

/32/ Hiroyasu, H.: "Diesel Engine Combustion and its Modelling", Diagnostics and modelling of combustion in reciprocating engines Symposium, Tokyo, Sept. 4.-6., (1985), pp. 53-75.

/33/ Katoh, J., Ohkubo, Y., Ohtsuka J. and Sugiyama, K.: "LDV Measurements of Swirl Flow in Internal Combustion Engines", Diagnostics and modelling of combustion in reciprocating engines Symposium, Tokyo, Sept. 4.-6., (1985), pp. 193-202.

/34/ Obokata, T.: "Velocity Measurements of Gas Flow in a Cylinder of Spark-Ignition Engine by L.D.V. with Fiber-Optic Pick-up", Diagnostics and modelling of combustion in reciprocating engines Symposium, Tokyo, Sept. 4.-6., (1985), pp. 107-113.

/35/ Durst, F., Krebs, H. und Weber H.: "Entwicklung von miniaturisierten Laser-Doppler-Optiken für Messungen in Motoren", Automobilindustrie, Vol. 3, (1985), pp. 327-334.

/36/ Durst, F. und Krebs H.: "Adaptive Optics for IC-Engine Measurements", Experiments in Fluids, Vol. 4, (1986), pp. 232-240.

/37/ Krebs, H. und Tropea, C.: "Geschwindigkeitsmessungen in Modelldieselmotoren mit LDA-Sonden", LSTM-Bericht 92/I/85, (1985).

/38/ Buchhave, P. and Knuthsen, J.: "Fiber-Optic Laser Doppler Anemometer Measurements", Proc. of the First International Symposium on Applications of Laser Doppler Anemometry to Fluid Mechanics, (1982), paper 13.1.

/39/ Grau, G.: "Optische Nachrichtentechnik", Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, (1981).

/40/ Ruck, B. und Durst, F.: "Laser-Doppler-Anemometer auf der Basis von Gradientenfasern", Technisches Messen, Vol. 50, (1983), pp. 2-43.

/41/ Durst, F., Melling. A. and Whitelaw, J.H.: "Principles and Practice of Laser-Doppler-Anemometry", 2nd Edition, Academic Press, London, (1982).

/42/ F&G Katalog: "Passive Bauelemente für die optische Nachrichtentechnik", Philips Kommunikationsindustrie AG, (1985).

/43/ Geckeler, S.: "Das Phasenraumdiagramm - ein vielseitiges Hilfsmittels zur Beschreibung der Lichtausbreitung in Lichtwellenleitern", Siemens Forschungs- und Entwicklungsbericht Band 10, Nr. 3, (1981).

/44/ Geckeler, S.: "Lichtwellenleiter für die optische Nachrichtenübertragung", Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, (1986).

/45/ Kogelnik, H.: "Imaging of Optical Modes - Resonators with Internal Lenses", The Bell System Technical Journal, (1965), pp. 455-494.

/46/ Rittich, D.: "Bestimmung des Modenspektrums in mehrmodigen Lichtwellenleitern", Dissertation, Wuppertal, (1985).

/47/ Durst, F. and Krebs, H.: "LDA-Optics Development for Measurements in Internal Combustion Engines", Proc. of the Second International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lissbon, (1984), paper 6.5.

/48/ Durst, F. and Krebs, H.: "Adaptive Optics for IC-Engine Measurements", 2nd International Conference On Optical Fiber Sensors, Stuttgart, (1984), pp. 29-34.

/49/ Spectra-Physics Instruction Manual, Model 165 Ion Laser with Model 265 Power Supply.

/50/ Peterson, J.C. and Maurer, F.: "A Method for the Analysis of Laser-Doppler Signals Using a Computer in Connection with a Fast A/D Converter", Proc. of the LDA-Sym., Copenhagen, (1975).

/51/ Durst, F. and Tropea, C.: "Processing of Laser-Doppler Signals by Means of a Transient Recorder and a Digital Computer", SFB80/E/118, Sonderforschungsbereich 80, Universität Karlsruhe, (1977).

/52/ Mc Laughlin, D.K. and Tiedermann, W.G.: "Biasing correction for individual realisation of laser anemometer measurements in turbulent flows", The Physics of Fluids, Vol. 16, (1973), pp. 2082-2088.

/53/ Hoesel, W. and Rodi, W.: "New biasing elimination method for Laser-Doppler velocimeter counter processing", Rev. Sci. Instrum., Vol. 48, (1977), pp. 910-919.

/54/ Durao, D.F.G., Laker, J. and Whitelaw, J.H.: "Bias effects in laser Doppler anemometry", J. Phys. E.: Sci. Instrum., Vol. 13, (1980), pp. 442-445.

/55/ Erdmann, J.C. and Tropea, C.: "Turbulence-Induced Statistical Bias in Laser Anemometry", SFB80/ET/198, Sonderforschungsbereich 80, Universität Karlsruhe, (1981).

/56/ Erdmann, J.C., Lehmann, B. and Tropea, C.: "The Statistical Bias of Laser Anemometry Applied in Sinusoidal Flow Fields", LSTM 23/TE/83, Universität Erlangen, (1983).

/57/ Durst, F., Ernst, F. and Founti, M.: "A New Counter Signal Processor For True Time-Averaged Fluid Velocity Measurements", Proc. of the Second International Symposium on Application of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lissabon, (1984), paper 4.4.

/58/ Iten, P.D. and Mastner, J.: "A laser-Doppler velocimeter offering high spatial and temporal resolution", Brown Bovers Res. Report KLR-71-07, (1971).

/59/ TSI Model 1990 B Signal Processor Counter Type Instruction Manual, TSI P/N 1990 147, (1982).

/60/ Humphrey, J.A.C., Melling, A. and Whitelaw, J.H.: "Laser-Doppler-anemometry for the verification of turbulence models", Proc. of Conf. on Engineering Uses of Coherent Optics, Strathclyde University, Cambridge University Press, (1975).

/61/ Van de Hulst, H.C.: "Light-Scattering by Small Particles", John Wiley and Sons, New York, (1957).

/62/ Durst, F.: "Scattering Phenomena and their Application in Optical Anemometry", ZAMP, Vol. 24, (1973), pp. 619-643.

/63/ Melling, A. and Whitelaw, J.H.: "Seeding of Gas Flows for Laser Anemometry", DISA information No. 15, (1973), pp. 5-14.

/64/ Mie, G.: "Beiträge zur Optik trüber Medien", Ann. Phys., Vol. 25, (1908), p. 377.

/65/ Betriebsanleitung Industriemotor BMW 403, Bayerische Motorenwerke AG, München.

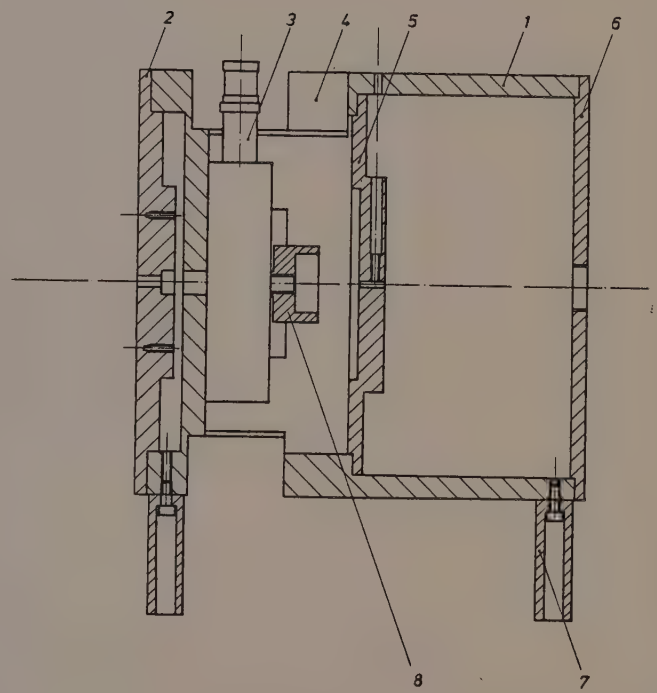
/66/ Durst, F., Jungbluth, G., Krebs, H., Tropea, C.D., Krause G., Rimmelspacher, B. und Oberländer, V.: "Anwendung der Laser-Doppler-Anemometrie zur Ermittlung der Einlaßturbulenz sowie deren Einfluß auf den Verbrennungsablauf und andere motorische Kenngrößen", Abschlußbericht, FVV-Vorhaben 288 "Einlaßturbulenz", (1985).

/67/ Tropea, C.: A practical aid for choosing the shift frequency in LDA", Experiments in Fluids 4, (1986), pp. 79-80.

/68/ Yanta, W.J.: "Turbulence measurements with a laser Doppler velocimeter ", Naval Ordinance Labs., NOLTR, (1973), pp. 73-94.

A N H A N G A

Technische Zeichnungen der Einkopplung

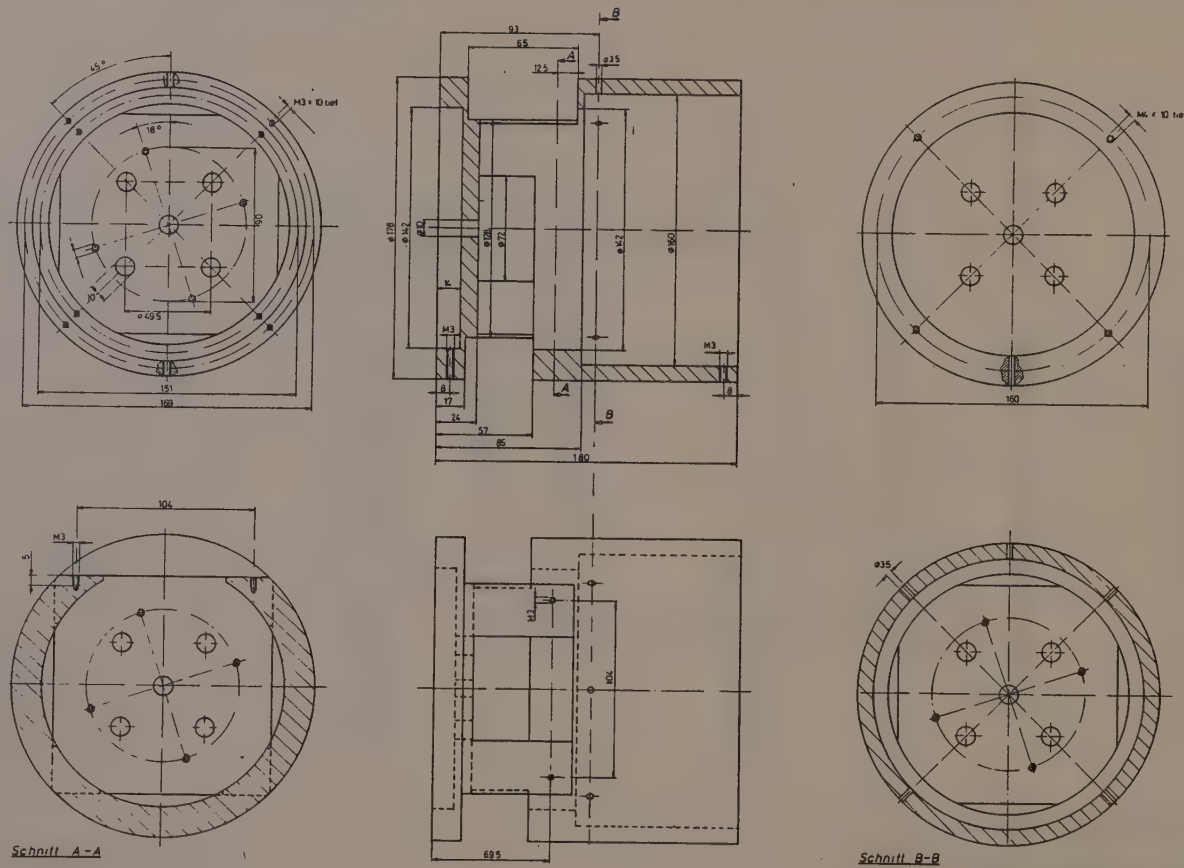


			Maßstab 1 : 1
	Datum	Name	Fünffachfaserein-kopplungsmodul
Bearb.	11.8.84	[illegible]	
Gepr.			
Norm.			
Zust.	Änderung	Datum Name	Blatt 0

Bestell-Nr. 643450 9095 gigm

Stückliste Einkopplung

Anzahl	Bezeichnung	Teilenummer
1	Gehäuse	1
1	Prismenhalteplatte	2
1	Fünffach-Verschiebetisch	3
1	Gehäusesegment	4
1	Faserhalteplatte	5
1	Deckel	6
2	Fuß	7
5	Linsenhalter	8

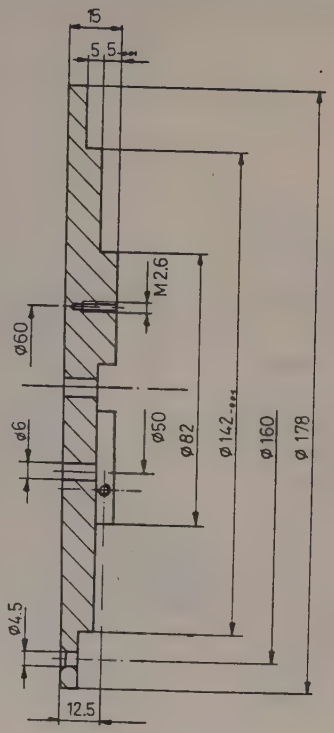


Schnitt A-A

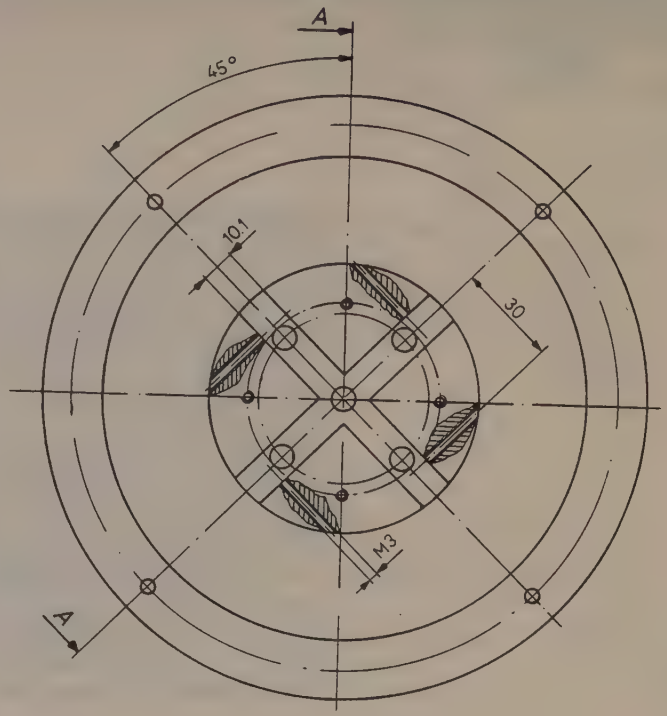
Schnitt B-B

			1:1
	8.79.84		Gehause
			Teil 1

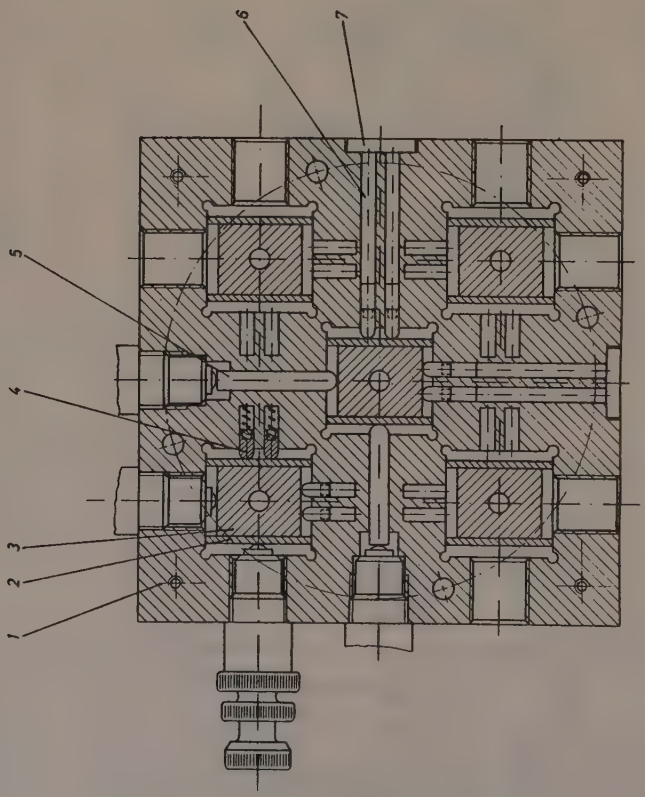
- A4 -



Schnitt A - A

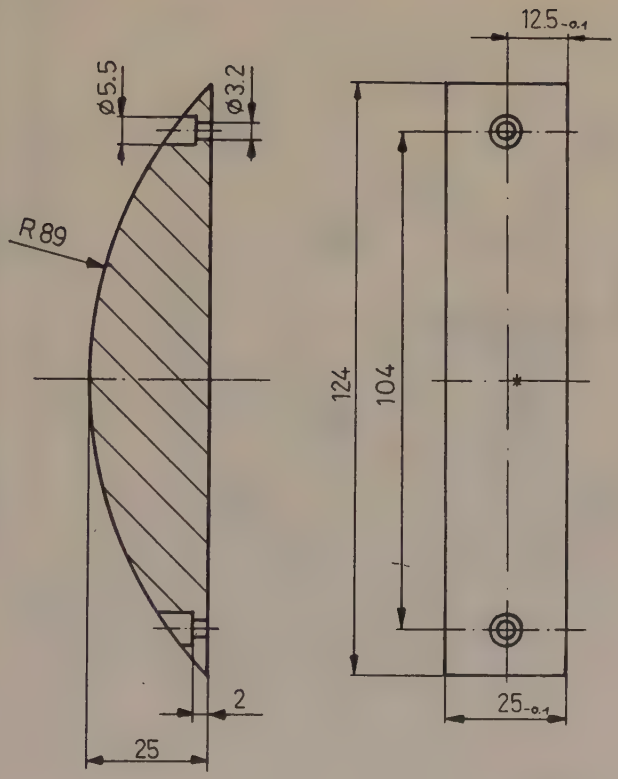


						Maßstab 1 : 1	
				Datum	Name		
			Bearb	13.9.84	Krabs	Prismenhalteplatte	
			Gezr			Teil 2	
			Norm				Blatt 2
Zust	Änderung	Datum	Name				Bl



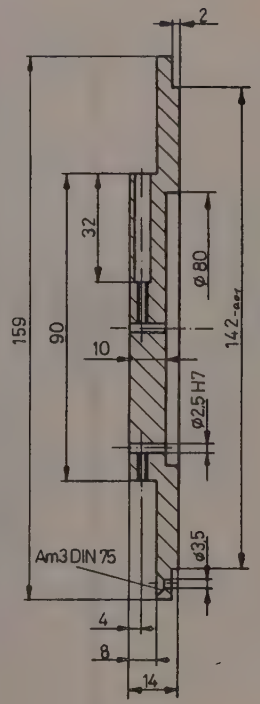
2:1

Fünfstrahl
Einkopplungsmodul

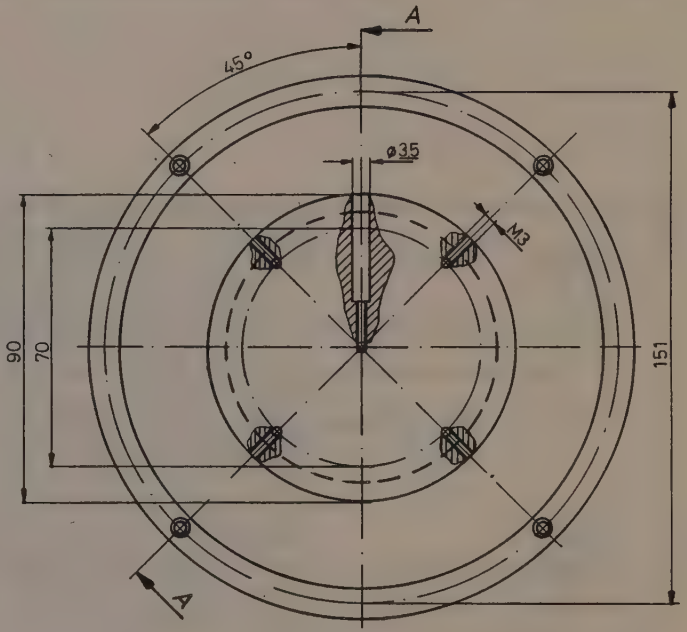


						Maßstab 1 : 1	
					Datum	Name	Gehäusesegment Teil 4
				Bearb	13.9.84	Krebs	
				Gepr			
				Norm			
							Blatt 3
							Bl
Zust	Änderung	Datum	Name				

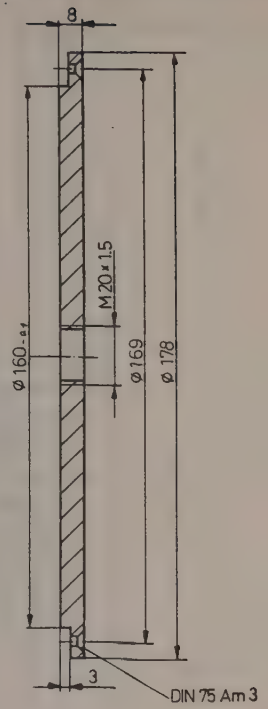
Bestell-Nr 643 310 80185 gdm

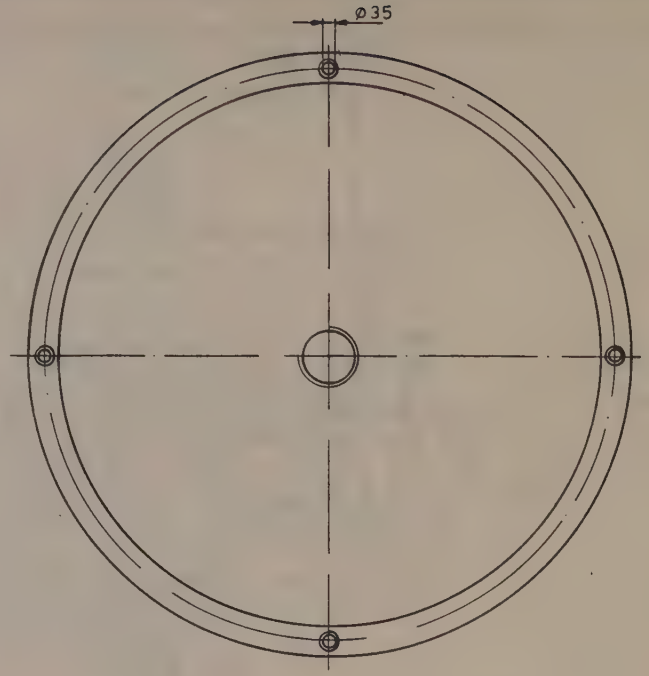


Schnitt A-A

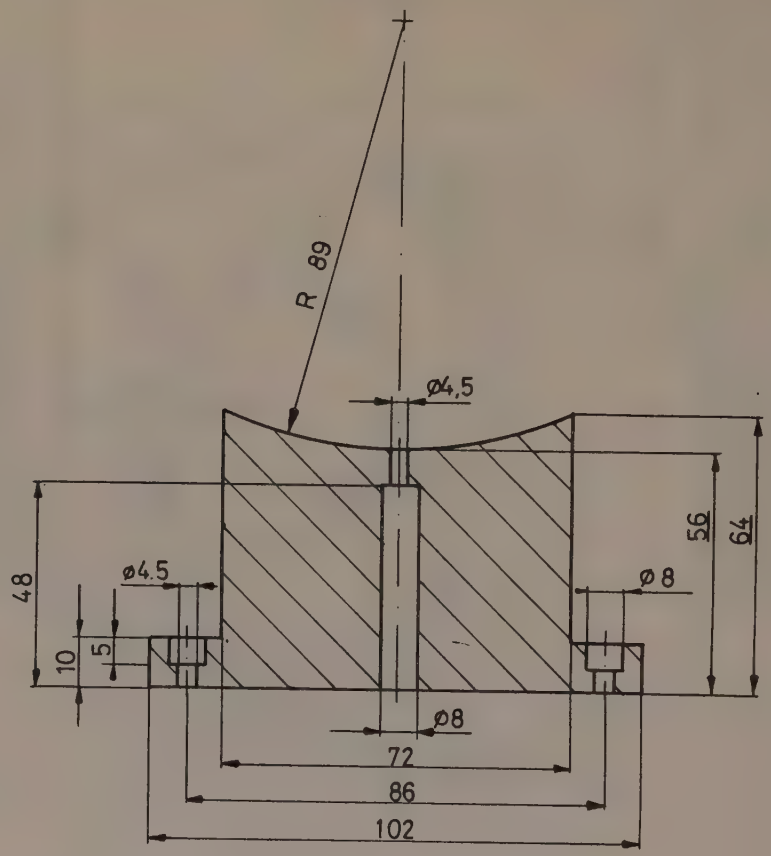


							Maßstab	1 : 1
					Datum	Name		
				Bearb	13.9.84	Krebs	Faserhalteplatte	
				Gepr			Teil 5	
				Norm				
								Blatt 4
Zust	Änderung	Datum	Name					Bl





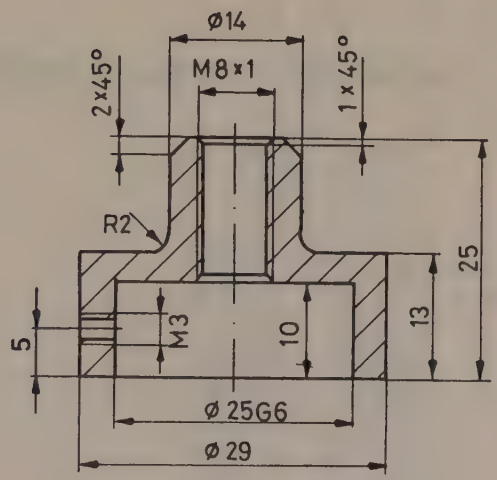
					Maßstab 1 : 1	
			Datum	Name	Deckel	
			Bearb 13.9.84	Krebs		
			Gepr		Teil 6	
			Norm			Blatt 5
Zust	Änderung	Datum	Name			31



15 dick

						Maßstab	1 : 1
					Datum	Name	
				Bearb.	13.9.84	Krebs	Fuß
				Gepr.			Teil 7
				Norm			
							Blatt 6
Zust	Änderung	Datum	Name				Bl

Bestell-Nr 643 370 80185 gdm

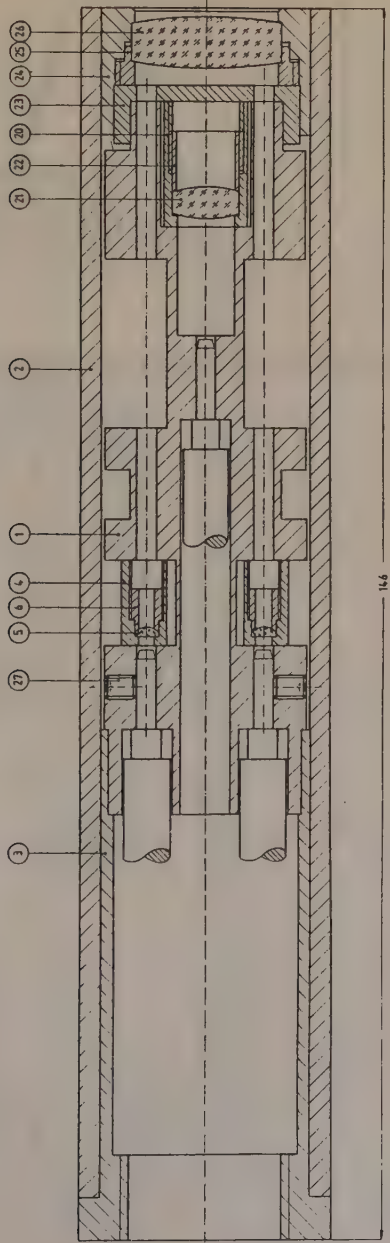


					Maßstab 2 : 1	
				Datum	Name	Linsenhalter
			Bearb.	13.9.84	Krebs	
			Gepr.			
			Norm			Teil 8
						Blatt 7
						Bl
Zust	Änderung	Datum	Name			

Bestell-Nr 643 310 801 ... 153

A N H A N G B

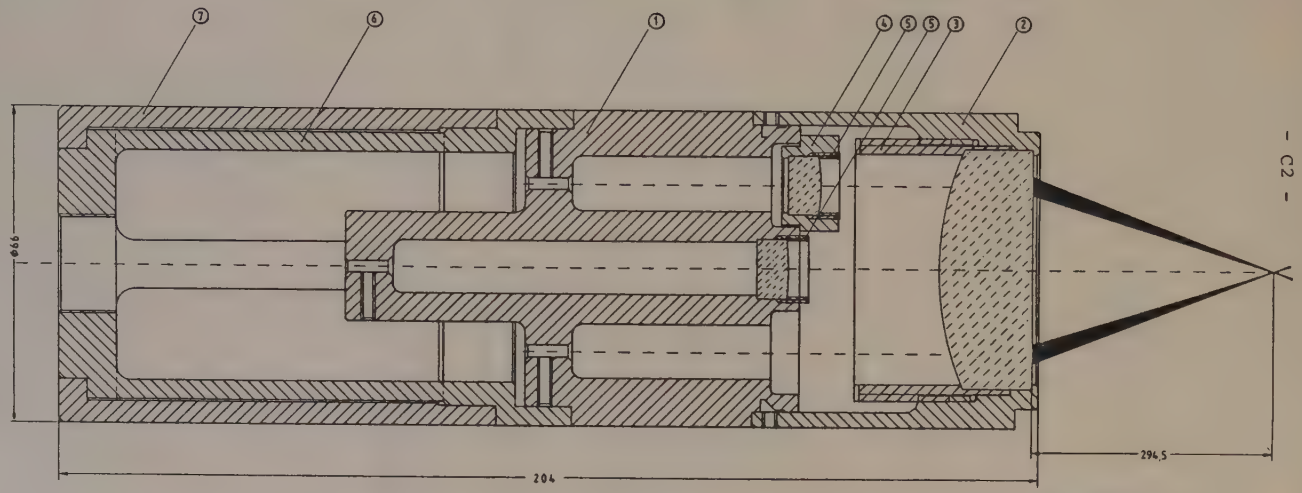
Zusammenbauzeichnung der Ottosonde



OPTIK (ZWEIKANAL)

A N H A N G C

Zusammenbauzeichnung der Dieselsonde (Prototyp)



Strahlabstand 35mm
bei Sendelinse mit 300mm Brennweite

			Maßstab 2 : 1
Zust. Änderung	Datum Name	Datum 9.10.85	Name Hallmann	LOA Sonde

L E B E N S L A U F

Name:	Herbert K R E B S	
Geburtsdatum/-ort:	3. März 1957 in Ludwigshafen am Rhein	
Familienstand:	verheiratet, 1 Kind	
Schulbildung:	1964 - 1967	Volksschule Bad Dürkheim
	1967 - 1976	Gymnasium Bad Dürkheim
	1976 - 1982	Universität Karlsruhe (TH)
Berufsausbildung:	1982 - 1983	wissenschaftlicher Angestellter Universität Karlsruhe
	1983 - 1986	wissenschaftlicher Angestellter Universität Erlangen

Bad Dürkheim, den 13.07.86

COPY PRINT
Klaus Feller
Marquardsenstr. 21
8520 Erlangen
Tel.: 0 91 31 / 24 220